GUIDE DE LA MESURE ÉLECTRIQUE

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

SHOUT
SHARE
IT

Électronique, électrotechnique, automatique, aux éditions DUNOD

- *Acquisition de données*, 2e éd., Asch et coll., 528 p., 2003
- *Les capteurs en instrumentation industrielle*, 6e éd., Asch et coll., 864 p., 2006
- *Radiocommunications numériques* (en 2 volumes), 2e éd., Baudoin et Villegas, 672 p. et 480 p., 2007
- *Schémas et circuits électroniques* (en 2 volumes), 5e éd., Bourgeron, 512 p. et 536 p., 2005
- *Les spécifications fonctionnelles - Automatismes industriels en temps réel*, Brenier, 432 p., 2001
- *Maintenance électrotechnique*, Brown, Rawtani et Patil, 296 p., 2006
- *Compatibilité électromagnétique*, 2e éd., Charoy, 696 p., 2005
- *Parasites et pertubations des électroniques - CEM* (en 4 volumes), 2e éd., Charoy, 2007
- *LabVIEW 6.1- Programmation et applications*, Cottet, 432 p., 2001
- *Systèmes temps réel de contrôle-commande*, Cottet et Grolleau, 568 p., 2005
- *Électronique appliquée aux hautes fréquences, principes*, De Dieuleveult, 440 p., 2001
- *Principes et applications de l'électronique* (en 2 volumes), De Dieuleveult, 344 p. et 384 p., 1997
- *Tracés des circuits imprimés*, 2e éd., Dunand, 128 p., 2000
- *Micro et nano-électronique*, Fanet, 416 p., 2006
- *Perturbations harmoniques*, Félice, 192 p., 2001
- *Le bus USB* (+ CD-Rom), 3e éd., Fenard, 280 p., 2007
- *Électricité pratique*, Fouchet, 392 p., 1984
- *Électronique pratique*, 2e éd., Fouchet, 448 p., 1986
- *Instrumentation industrielle*, Grout, 544 p., 2002
- *Guide de la protection des équipements électriques*, Hewitson, 344 p., 2007
- *Les antennes*, 3e éd., Houzé, 376 p., 2006
- *Énergie solaire photovoltaïque*, 3e éd., Labouret et Villoz, 368 p., 2006
- *Systèmes électroniques embarqués et transport*, Louvel, 336 p., 2006
- *Aide-mémoire des composants électroniques*, 3e éd., Mayé, 184 p., 2005
- *Les alimentations électroniques*, 2e éd., Mayé, 480 p., 2006
- *Moteurs électriques industriels*, Mayé, 392 p., 2005
- *Moteurs électriques pour la robotique*, 2e éd., Mayé, 296 p., 2006
- *Aide-mémoire d'électrotechnique*, Mayé, 320 p., 2006
- *Applications en identification radiofréquence et cartes à puces sans contact*, Paret, 424 p., 2003
- *Identification radiofréquence et cartes à puce sans contact - Description*, Paret, 336 p., 2001
- *Le bus CAN - Applications*, Paret, 368 p., 2001
- *Réseaux multiplexés pour systèmes embarqués*, Paret, 400 p., 2005
- *Sécurité et automatique*, PILZ, 328 p., 2005
- *Commande électronique des moteurs électriques*, 2e éd., Pinard, 632 p., 2007
- *Convertisseurs et électronique de puissance*, Pinard, 368 p., 2007
- *Pratique des oscilloscopes*, Reghinot et Becker, 368 p., 1984
- *PSpice - Méthodologie d'utilisation et techniques avancées* (+ CD-Rom), Rousseau, 264 p., 2007
- *VHDL : méthodologie de design et techniques avancées*, Schneider, 304 p., 2001
- *300 schémas d'alimentation*, 2e éd., Schreiber, 256 p., 1998
- *400 nouveaux schémas radiofréquences*, Schreiber, 368 p., 2000
- *Les cartes à puce* (+ CD-Rom), 2e éd., Tavernier, 360 p., 2007
- *Les microcontrôleurs PIC 10, 12, 16* (+ CD-Rom) - *Description et mise en œuvre*, 3e éd., Tavernier, 336 p., 2007
- *Microcontrôleurs PIC : programmation en Basic* (+ CD-Rom), Tavernier, 272 p., 2006
- *Microcontrôleurs PIC - Recueil d'applications* (+ CD-Rom), 2e éd., Tavernier, 368 p., 2005
- *Programmation en C des PIC* (+ CD-Rom), Tavernier, 224 p., 2005
- *Automatisation en hors procédés*, Vogt, 320 p., 2003
- *Génie électrotechnique*, Warne, 544 p., 2007

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Christian Peutot • Éric Félice • Alain Kohler

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

GUIDE DE LA MESURE ÉLECTRIQUE

Bâtiment et industrie

Préface de **Jean-Paul Chassaing**

L'USINENOUVELLE

DUNOD

Consultez nos catalogues sur le Web

www.dunod.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Nous tenons à remercier les sociétés Agilent, CATU, Chauvin Arnoux, Enerdis, Eurosmart, Fluke, Française d'instrumentation, LeCroy, Metrix, National Instruments, Peak Electronic Design, Schneider Electric, Socomec, Tektronix de nous avoir autorisés à reproduire les documents dont ils sont propriétaires.

Illustrations : Alain et Ursula Bouteveille

© Dunod, Paris, 2007
ISBN 978-2-10-005409-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

PRÉFACE

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'électricité constitue aujourd'hui la forme la plus aboutie des vecteurs permettant la maîtrise des transferts énergétiques et informationnels dont les systèmes artificiels se nourrissent pour accompagner le développement des usages dans nos sociétés industrialisées.

Ce développement des usages correspond au développement d'applications au sein desquelles les technologies sont plurielles et où les transformations, déplacements et stockages s'opèrent sur de l'énergie, des matières et des informations au sein de procédés dont les comportements et les propriétés doivent être mesurables. Ces applications, de plus en plus sophistiquées, concernent tous les grands secteurs d'activité comme l'urbanisme, l'industrie, les transports, la santé, les télécommunications, les loisirs ; elles doivent nécessairement satisfaire aux notions qui s'attachent au développement durable en répondant simultanément, d'une part, à des critères de sobriété et d'efficacité énergétique et, d'autre part, de limitation des impacts produits sur l'environnement et la santé des usagers.

Bien évidemment, toutes ces contraintes doivent être prises en compte lors de la conception car il s'agit aussi de limiter les impacts environnementaux dans l'ensemble du cycle de vie des applications, produits, installations ou systèmes. L'évaluation de tous les facteurs qui s'attachent à l'économie générale de l'application et à son écologie, depuis sa conception jusqu'à son démantèlement en passant par sa maintenance en phase d'exploitation, nécessite de maîtriser la mesure des grandeurs physiques caractéristiques. Grâce aux transducteurs et aux conditionneurs, ces grandeurs physiques se ramènent le plus souvent à l'évaluation d'une grandeur électrique dont le traitement est réalisé de manière analogique ou numérique, localement ou à distance, avec ou sans support physique, pour l'acheminement de l'information.

Pour autant, en raison de sa forme invisible et de sa caractérisation abstraite, le vecteur électrique nécessite, pour sa mesure, une approche sécuritaire très formalisée qui passe par un questionnement systématique. En effet, les choix des appareils de mesures et des équipements de protection utilisés lors des investigations requièrent, tout à la fois, un haut niveau de qualification professionnelle et une habilitation électrique en cours de validité. Par ailleurs, la dichotomie qui existait autrefois entre les connaissances qui s'attachent aux courants forts ou aux courants faibles n'est plus susceptible de satisfaire à l'étude des systèmes complexes où, parfois, les conducteurs de puissances peuvent véhiculer les signaux de communication et où le réseau informatique peut contribuer à la disponibilité de l'énergie électrique.

C'est pour répondre à l'ensemble des questions que doivent se poser les professionnels électriciens, et tous les techniciens qui s'intéressent à la mesure des grandeurs physiques, *via* le vecteur électrique, que cet ouvrage a été conçu.
Grands professionnels de l'électricité et de la mesure électrique, les auteurs ont choisi de faire une large place aux questions posées par la sécurité électrique dans la mise en œuvre des appareils de mesure, chaînes d'acquisition de données et autres contrôleurs d'installation. En privilégiant la prévention des risques et les moyens de mettre en œuvre les appareils de mesure en fonction des différents contextes liés, notamment, aux schémas de liaison à la terre et aux couplages qui s'y rapportent, les auteurs prennent clairement le parti de produire une relation étroite entre la théorie et la pratique sur des études de cas concrets. La normalisation et la réglementation trouvent naturellement leur place dans les chapitres de l'ouvrage et de nombreux liens proposent des approfondissements en direction des sites Internet de grandes enseignes de la profession. En fin de chapitre, les choix à opérer sont présentés sous la forme d'un algorithme qui récapitule les critères à prendre en compte en fonction de chaque situation. Les matériels de mesures présentés dans l'ouvrage sont des matériels référencés dans les catalogues des constructeurs, ils ont été choisis parmi ceux qui répondent aux usages prévus par les auteurs. Ainsi, les spécifications précises de chaque matériel, lié à un fabricant, correspondent aux nécessités théoriques des mesures à effectuer et à la mise en œuvre réelle de ces mesures en toute sécurité.
La pertinence des mesures envisagées dans cet ouvrage doit beaucoup à la qualité du questionnement qui prévaut en matière de prévention des risques d'origine électrique et à l'expérience acquise par les auteurs en milieu professionnel. Le caractère exhaustif des méthodes de mesure et des choix de matériels présentés dans les différents chapitres doit assurément satisfaire aux questions que se posent les professionnels, les enseignants et les étudiants qui ont à mettre en œuvre des dispositifs de mesures électriques sur des systèmes ou des équipements complexes.
Remercions vivement les auteurs pour leur pragmatisme et la grande qualité de la synthèse présentée dans ce *Guide de la mesure électrique*.

Jean-Paul CHASSAING

Inspecteur général de l'Éducation nationale

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Avant-propos XI

Entrées visuelles XIII

Différents niveaux et domaines d'intervention XIII

Mesure électrique pour l'habitation et le milieu tertiaire XIV

Mesure électrique et maintenance en milieu industriel XV

A

Sécurité électrique

1 • Risques électriques 3

1.1 Introduction 3

1.2 Statistiques sur les accidents du travail 3

1.3 Inventaire des risques 3

1.4 Causes d'accident par électrisation 4

1.5 Effets du courant électrique 6

1.6 Résistance du corps humain 8

1.7 Effets de la tension et de l'intensité conjuguées 10

1.8 Domaines de tension 10

2 • Prévention des risques et habilitations 12

2.1 Moyens de protection contre les contacts directs 12

2.2 Moyens de protection contre les contacts indirects 14

2.3 Préventions et sécurisation des personnels 15

3 • Normes et accessoires de sécurité adaptés à la mesure 27

3.1 Responsabilités 27
3.2 Exigences réglementaires 28
3.3 Obligations de chacun 29
3.4 Définition des termes figurant dans la norme CEI 61010-1 29

B

Pratique de la mesure

4 • Mesure de tension 47

4.1 Détection de tension après consignation d'une installation 47
4.2 Testeurs et multitesteurs 53
4.3 Sonde différentielle de tension 59
4.4 Mesure de tension avec un oscilloscope 63
4.5 PC/multi-instrument : carte d'acquisition 119

5 • Mesure de terre et de résistivité 131

5.1 Introduction 131
5.2 Sécurité des personnes 132
5.3 Sécurité des circuits 135
5.4 Prises de terre 141
5.5 Conducteurs de terre 144
5.6 Mise à la terre des équipements électroniques et informatiques 145
5.7 Mesure de résistivité des sols 145
5.8 Mesures de terre 149
5.9 Mesures de boucle Phase-PE 155
5.10 Mesure de couplage 156
5.11 Mesure de continuité 159
5.12 Choix d'un mesureur de terre 160

6 • Mesure de l'isolement ou résistance d'isolement 162

6.1 Rappels théoriques 162
6.2 Mesure d'isolement par un appareil portatif 163
6.3 Contrôleur d'isolement fixe 171

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

7 • Test de différentiel et mesure de courant de court-circuit 185

7.1 Rappels théoriques 185
7.2 Structure interne d'un disjoncteur différentiel monophasé 186
7.3 Présentation et choix des dispositifs différentiels à courant résiduel (DDR) 188
7.4 Rappels sur les différents schémas de liaison à la terre : SLT ou régime de neutre 194
7.5 Mesure de courant de court-circuit 213

8 • Mesure de courant 221

8.1 Capteurs de courant 221
8.2 Les différents types de capteurs de courant contemporains 222
8.3 Fonctionnement des capteurs nécessaires à la mesure de courant 223
8.4 Matériels de mesure 242
8.5 Pince ampèremétrique 245
8.6 Applications des différentes pinces ampèremétriques 250
8.7 Guide de choix 251
8.8 Appareillages 253
8.9 Les pinces au regard de la norme 253

9 • Mesure de puissance, d'énergie et de qualimétrie 255

9.1 Mesure de puissance 255
9.2 Mesures d'énergie 295
9.3 Mesures d'énergie et qualimétrie 302

10 • Chaînes d'acquisition 332

10.1 Autres centrales d'acquisition : appareils de génération et d'acquisition modulaire 332
10.2 Indicateurs numériques et analogiques 333
10.3 Transducteurs et convertisseurs de mesure numériques et analogiques 337
10.4 Data logger 344
10.5 Enregistreurs 348
10.6 Matériels entrant dans la chaîne d'acquisition 354
10.7 Matériels entrant dans la chaîne d'acquisition : liaison des données sans fil 362

11 • Mesure de la température 369

11.1 Capteurs à variation de résistance 369
11.2 Capteurs thermocouples 375
11.3 Sonde infrarouge avec et sans émissivité réglable 382
11.4 Data logger 398
11.5 Choix d'un thermomètre (capteur de température et appareil de mesure) 398

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

12 • Mesure de la vitesse 400
12.1 Quelques rappels 400
12.2 Vitesse de rotation 401
12.3 Vitesse de défilement 410

13 • Mesures d'appoint 415
13.1 Multimétrie 415
13.2 Mesure de continuité 428
13.3 Détection de câbles et de conducteurs 431
13.4 Mesure de rotation de phase 435
13.5 Mesure de signaux bas niveaux 437
13.6 Contrôleur multifonction de machines et d'appareillages électriques 449
13.7 Contrôleur multifonction d'installations électriques 455
13.8 Contrôleurs de transformateur de puissance 459

C

Préoccupations diverses liées à la mesure

14 • Séparation des circuits (isolation galvanique) 465
14.1 Attention aux boucles de masse dans les chaînes d'acquisition 465
14.2 Attention au mode commun ! 469

15 • Service après-vente et étalonnage – Instrumentation – Métrologie 473
15.1 Définition et contraintes 473
15.2 Étalonnage 473
15.3 Coûts 474
15.4 Conclusion 474

16 • Organismes de contrôle 475
16.1 Définition 475
16.2 Principaux organismes nationaux ou internationaux 476

17 • Adresses utiles 477

Index 483

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

AVANT-PROPOS

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Les mesures électriques constituent pour tout professionnel une démarche essentielle afin d'évaluer et de diagnostiquer l'état électrique de tout ou partie d'un équipement ou d'une installation, d'en contrôler les paramètres et ainsi :

– d'en assurer la maintenance et le dépannage (par exemple vérifier l'isolement d'un moteur électrique),
– de vérifier la qualité de l'énergie électrique (par exemple celle d'un réseau de distribution), de mettre en place des dispositifs d'économie d'énergie électrique, de détecter la présence d'harmoniques, etc.,
– de contrôler le respect des normes et réglementations.

Cet ouvrage présente les principes et les pratiques de la mesure en électricité, électrotechnique et automatismes, en milieu domestique, tertiaire ou industriel :

– application des règles de sécurité (consignation, utilisation des EPI),
– lecture et décodage du schéma de l'installation (lorsque celui-ci existe),
– pratique de la mesure (test et/ou relevés),
– diagnostic du dysfonctionnement ou analyse des paramètres mesurés,
– intervention, dépannage.

Il se destine principalement à l'ingénieur et au technicien en électrotechnique ou en automatismes, mais également à l'artisan électricien, au formateur ou encore à l'étudiant des filières électriques et électrotechniques.

L'un de ses objectifs est de proposer au lecteur une méthodologie de choix de l'appareil de mesure le plus adapté, une description de son utilisation en basse tension par des personnes habilitées, afin d'obtenir les relevés adéquats et nécessaires à une analyse précise de l'installation considérée.

Très pratique, l'ouvrage limite la théorie à une simple évocation des phénomènes physiques qui permettent la compréhension d'une pratique ou d'un concept lié à un matériel de mesure.

Les mesures présentées dans cet ouvrage, que l'on ne souhaitait pas trop volumineux, sont limitées volontairement à l'électricité, l'électrotechnique, les automatismes et à l'électronique de puissance. Néanmoins, les mesures de vitesse et de température, qui font partie intégrante du métier de l'électrotechnicien, sont traitées dans l'ouvrage.

L'ouvrage se découpe en trois grandes parties.

La *première partie* fait le point sur les risques d'utilisation de l'énergie électrique (chapitre 1), sur les modes opératoires à réaliser avant toute intervention en prévision

de ces risques (chapitre 2) et sur les normes et habilitations existantes dans le domaine (chapitres 2 et 3).

La *deuxième partie* est consacrée à la pratique de la mesure électrique. Elle traite notamment des mesures de tension (chapitre 4), de terre et de résistivité (chapitre 5), de l'isolement et de la résistance d'isolement (chapitre 6), des courants de court-circuit (chapitre 7), de courant (chapitre 8), de puissance et de la qualité énergétique (chapitre 9). Le chapitre 10 est en outre consacré à l'acquisition numérique ou analogique des données. Deux chapitres abordent la mesure de température (chapitre 11) et de vitesse (chapitre 12). Le chapitre 13 traite de mesures d'appoint.

Enfin l'ouvrage présente dans une *troisième et dernière partie* différentes informations non moins utiles sur l'isolation galvanique (chapitre 14), l'étalonnage des instruments et la métrologie (chapitre 15), et les organismes de contrôle (chapitre 16).

Tout au long de l'ouvrage sera faite la distinction entre les équipements portables, de tableaux et de laboratoire, qui bien souvent ne disposent pas de la même technologie. Nous constaterons la place de plus en plus importante prise par les équipements et logiciels informatiques, dans l'acquisition et la transmission des données. L'esthétisme (design industriel) et l'ergonomie ont également pris une part non négligeable dans la conception et la présentation des appareils de mesures.

L'évolution des technologies conduit le technicien à intervenir aujourd'hui sur des installations électriques associant courants forts et courants faibles. Nous avons veillé à décrire, dans le cadre de ce contexte actuel, les équipements de mesures correspondants.

Les références normatives sont précisées et constituent un enjeu incontournable pour une mesure de qualité et en parfaite sécurité.

Cet ouvrage se veut objectif en présentant les appareils de constructeurs représentatifs européens ou mondiaux dans leurs domaines respectifs.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Remerciements

Cet ouvrage que nous avons souhaité le plus complet possible, dans un domaine en constante évolution technologique et normative, a nécessité l'expertise précieuse et l'appui constant de la part de nombreux collaborateurs.

Nous tenons ainsi, au travers de ces quelques lignes, à remercier particulièrement, pour leur investissement tout au long de ce projet, les partenaires et entreprises suivantes :

– mesdames HELLWIG et RICHER, Société française d'instrumentation,
– monsieur ALAZARD, société Socomec,
– messieurs BAHROUN et BORIE, société Eurosmart,
– monsieur BENMAIZA, société Schneider Electric,
– monsieur RENARD, société National Instruments.

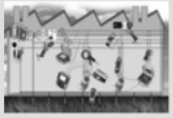
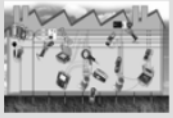
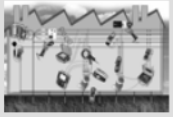
Les auteurs.

ENTRÉES VISUELLES

Différents niveaux et domaines d'intervention

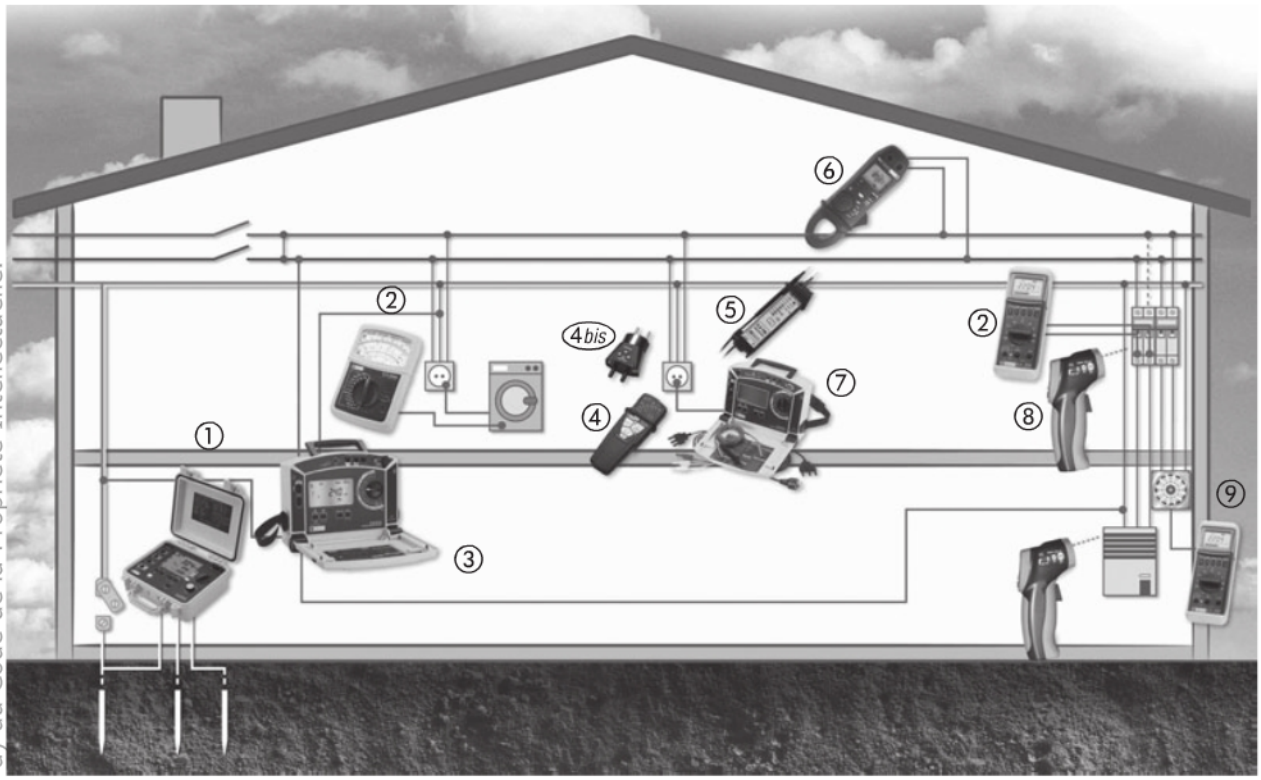
Pour s'orienter dans l'ouvrage, le lecteur bénéficie de précieux outils. Deux possibilités s'offrent notamment à lui : il peut soit consulter la table des matières ou l'index, soit parcourir les quelques pages qui suivent. Celles-ci comprennent les représentations schématisées d'une usine et d'un bâtiment (habitation ou bâtiment du tertiaire), et de leur installation électrique. Sur chacune de ces représentations, figurent une dizaine d'items clés de la mesure électrique, avec renvoi aux chapitres et paragraphes de l'ouvrage dans lesquels ils sont traités. C'est ainsi que le lecteur pourra accéder directement, selon ses besoins, selon son profil, au chapitre du livre correspondant à tel ou tel type de mesure et de problématique, en milieu industriel ou tertiaire.

Le tableau suivant associe chaque profil de lecteur au type de problématique rencontrée : en milieu tertiaire ou industriel.

Domestique Tertiaire	Industrie Maintenance	
		Artisan électricien
		Ingénieur et technicien en électrotechnique et automatismes
		Ingénieur et technicien de maintenance
		Tableautier – Ensemblier
		Professeur et étudiant en électricité bâtiment
		Professeur et étudiant en électrotechnique

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

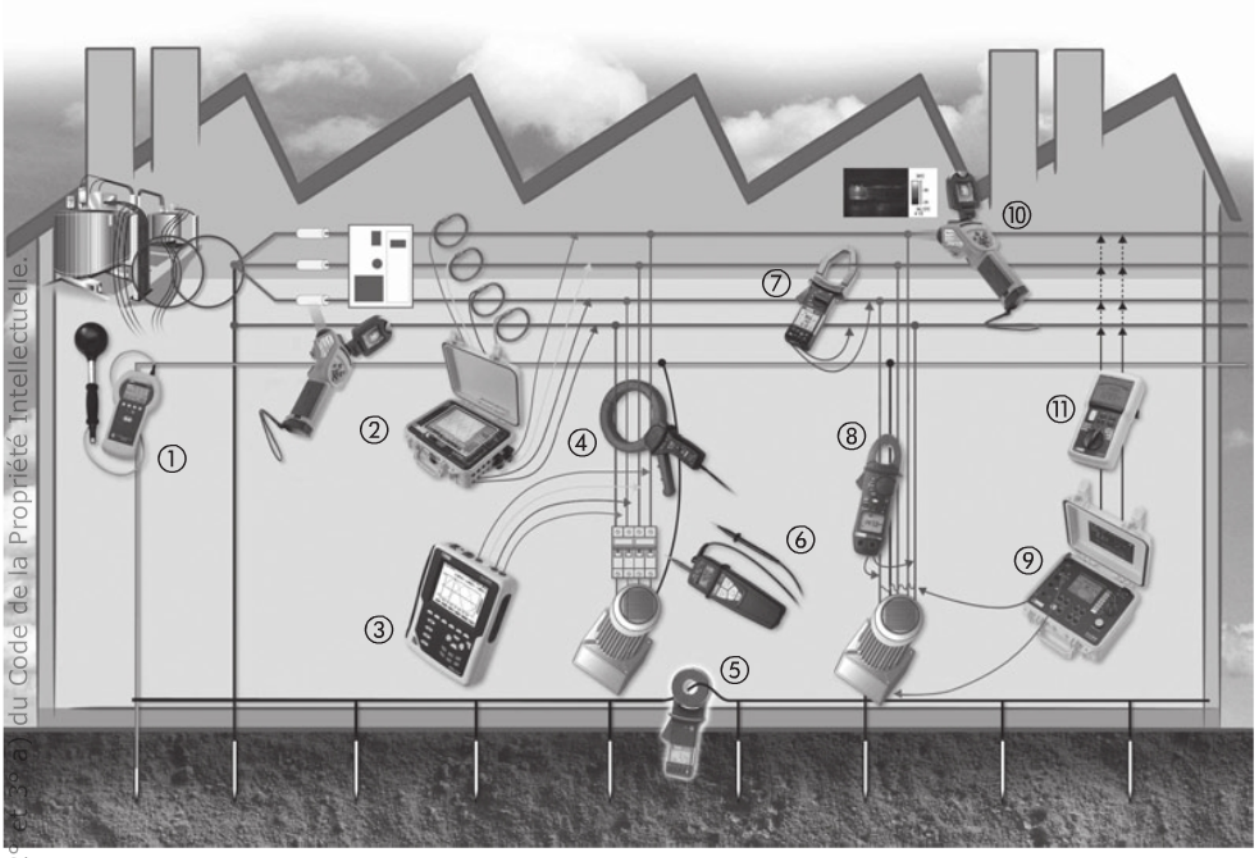
Mesure électrique pour l'habitation et le milieu tertiaire



1	Mesure de la résistance de prise de terre	§ 5.4 et 5.8
2	Multimétrie	§ 13.1
3	Contrôle d'installation (continuité, etc.)	§ 13.7
4	Test des différentiels (contrôleur universel)	§ 7.1, 7.2 et 7.4.3
4bis	Testeur de prise 2P+T	§ 4.1
5	Détection de câbles	§ 13.3
6	Mesure de courant, tension, puissance	§ 4.1 et 4.3, chapitre 8, § 9.1 et 9.2
7	Mesure d'isolement	§ 6.2
8	Mesure de température	§ 11.5
9	Mesure de signaux bas niveaux	§ 13.5

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Mesure électrique et maintenance en milieu industriel



1	Mesure de champ électromagnétique	§ 9.3.3
2	Contrôle d'installation	§ 13.7
3	Mesure de la qualité du réseau électrique	§ 9.3.2
4	Mesure de courant de fuite	§ 8.5.3
5	Mesure de boucle de terre	§ 5.9
6	Ordre des phases et détection de tension (DDT)	§ 4.1 et § 13.4 et 13.7
7	Mesure de puissance et d'harmoniques	chapitre 9 et § 9.3.2
8	Mesure de courant	chapitre 8
9	Mesure de résistance d'isolement	chapitre 6
10	Thermographie des installations	§ 11.3
11	Mesure d'isolement et de continuité	§ 6.3

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

A

Sécurité électrique

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

1 • RISQUES ÉLECTRIQUES

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

1.1 Introduction

L'**électricité** est une des formes d'énergie qui est la plus **répandue**, utilisée de tous en milieu **domestique** et **industriel**. Elle peut être de nature artificielle (créée par l'homme) ou naturelle (foudre…).
L'électricité peut pourtant, dans certaines circonstances, **compromettre la sécurité des personnes**. En effet, invisible, inaudible et inodore, elle reste pour beaucoup de personnes une **notion abstraite** et les **risques** liés à une mauvaise utilisation sont **mal perçus**.
Ainsi, on enregistre chaque année de nombreux **accidents** plus ou moins graves chez les personnes **averties ou non** de ces dangers.

1.2 Statistiques sur les accidents du travail

Si, en matière d'accidents du travail, l'électricité constitue une cause relativement **peu fréquente**, elle comporte, en revanche, un facteur de **gravité important**.

Tableau 1.1 – Nombre d'accidents d'origine électrique (CNAMTS, année 1994 sur 14 278 686 salariés).

	Accidents du travail tous risques confondus	Accidents du travail d'origine électrique	%
Avec arrêt (AT)	667 933	958	0,14
Mortels	608	13	1,61

Rappels succincts sur les dangers du courant électrique (source IRNS et Schneider) :

1.3 Inventaire des risques

– L'**électrocution** (issue fatale consécutive à une électrisation : choc électrique).
– Les **brûlures** de contact et internes.
– Les brûlures thermiques ou **FLASH** (**court-circuit** et amorçages).

– Les brûlures provoquées par un **incendie** ou une **explosion** dont l'origine est électrique.
– Les **chutes**.
– Les **autres risques** (mouvement intempestif d'un organe mécanique, impossibilité d'arrêt, non fonctionnement d'une sécurité, mise à l'arrêt imprévu d'un circuit de sécurité, perte de contrôle d'un processus en cours).

Pour les **autres risques**, seule une chute due à un mouvement intempestif provoquée par un courant électrique est un accident d'origine électrique.

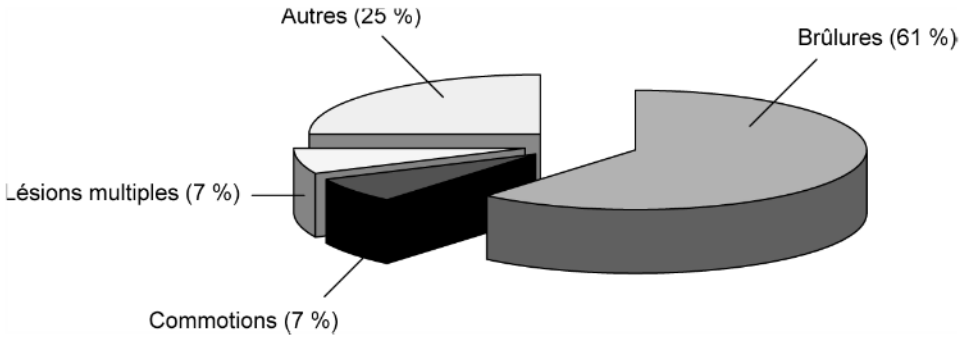


Figure 1.1 – Les effets du courant électrique et leur pourcentage.

1.4 Causes d'accident par électrisation

Il faut distinguer l'**électrisation** de l'**électrocution** :

– L'**électrisation** : c'est la réaction du corps due à un contact accidentel avec l'électricité.
– L'**électrocution** : c'est une électrisation avec issue fatale.

L'origine de l'accident dépend du type de contact entre la personne et l'élément sous tension. Ces types de contact sont de deux sortes : les contacts **directs** et les contacts **indirects** (*figure 1.2*).

– **Contact direct** : contact d'une personne avec une **partie active** du **circuit**.
– **Contact indirect** : contact d'une personne avec une **masse** mise accidentellement sous tension suite à un **défaut d'isolement**.

■ Définitions

Partie active : toute partie conductrice destinée à être sous tension en service normal.
Circuit : ensemble de conducteurs et de matériels alimentés à partir de la même origine et protégés contre les surintensités par le ou les mêmes dispositifs de protection.
Masse : partie conductrice d'un matériel électrique, susceptible d'être touchée par une personne, qui n'est pas normalement sous tension mais peut le devenir en cas de défaut d'isolement des parties actives de ce matériel.
Défaut d'isolement : défaillance de l'isolation d'une partie active d'un circuit électrique entraînant une perte d'isolement de cette partie active pouvant aller jusqu'à une liaison accidentelle entre deux points de potentiels différents.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

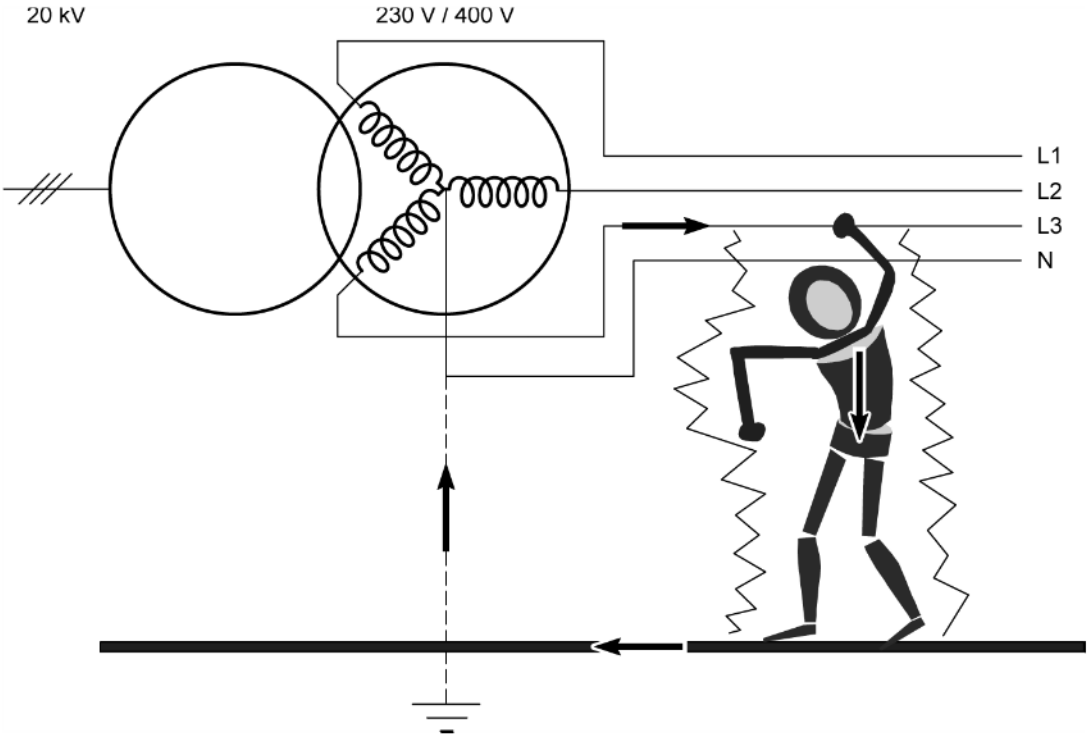


Figure 1.2a – Contact direct possible.

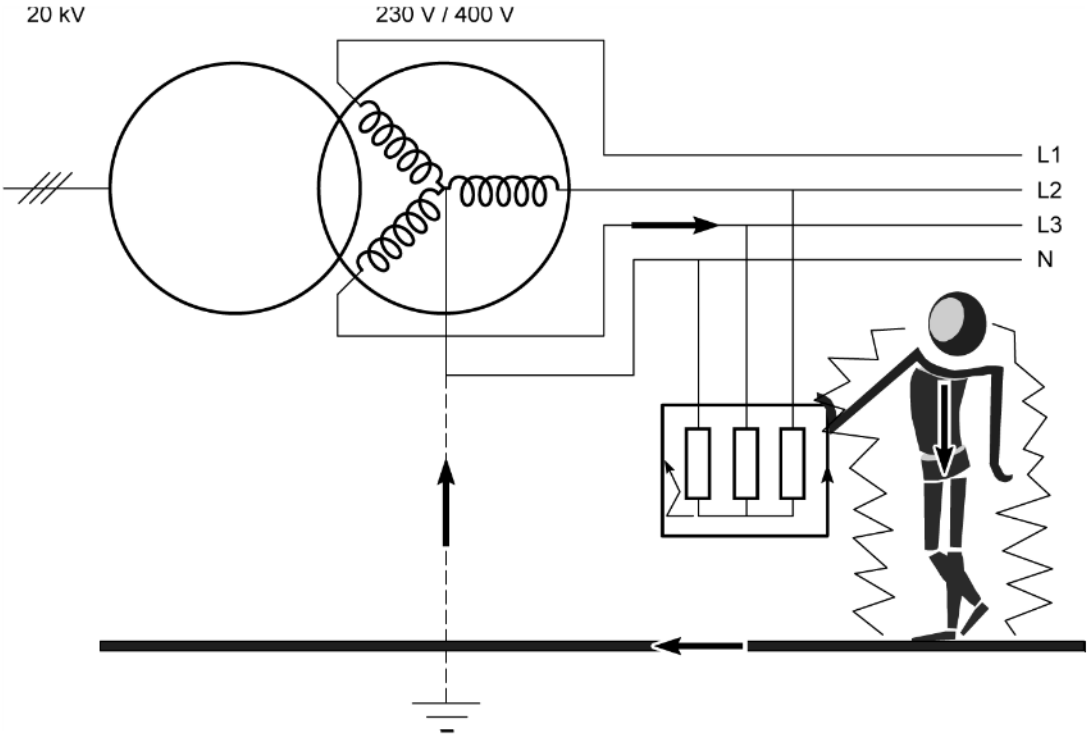


Figure 1.2b – Contact indirect possible.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

1.5 Effets du courant électrique

Il existe deux sortes de courant électrique :

– le **courant alternatif** (distribué sur le réseau public par EDF en 230 V entre phase et neutre ou en 3 × 400 V entre phases, avec ou sans neutre) ;
– le **courant continu** (obtenu à partir d'alimentations spéciales dites stabilisées, de batteries ou de machines tournantes).

Ces deux types de courant sont **dangereux**.

Tableau 1.2 – Valeurs des effets de l'électrisation du corps humain (en mA).

Seuils	Effets du courant alternatif	Effets du courant continu
Perception	0,5 mA	2 mA
Réaction réflexe	5 mA	
Non lâché	10 mA	non défini
Paralysie respiratoire	25 mA - 3 min	
Fibrillation cardiaque	50 mA - 1 s	130 mA

Attention ! Pour simplifier, il n'est pas toujours tenu compte du **temps de passage** du courant, qui est un facteur tout aussi déterminant (voir la caractéristique temps/courant en alternatif ci-dessous).

■ Intensité traversant le corps humain

L'intensité est déterminée par la tension et l'impédance du corps humain.
Les brûlures électrothermiques sont provoquées par l'énergie dissipée par effet Joule tout le long du trajet du courant :

$$W\,(\text{joules}) = R\,(\text{ohms}) \,.\, I^2\,(\text{ampères}) \,.\, t\,(\text{secondes})$$

expression pouvant s'écrire :

$$W = \frac{U^2}{R} t$$

Cette expression prouve l'importance de se prémunir de tout contact dès que la tension dépasse les seuils de sécurité (50 V, 25 V ou 12 V) et d'**augmenter les protections** (R) si la tension augmente (U).
Pour des courants inférieurs à 300 mA environ, une sensation de chaleur est sentie dans les extrémités pendant le passage du courant.
Les courants transversaux d'intensité au plus égale à 300 mA passant à travers le corps humain pendant plusieurs minutes, peuvent provoquer des arythmies cardiaques réversibles, des marques de courant, des brûlures, des vertiges et parfois l'inconscience.
Au-dessus de 300 mA, l'inconscience se produit fréquemment.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

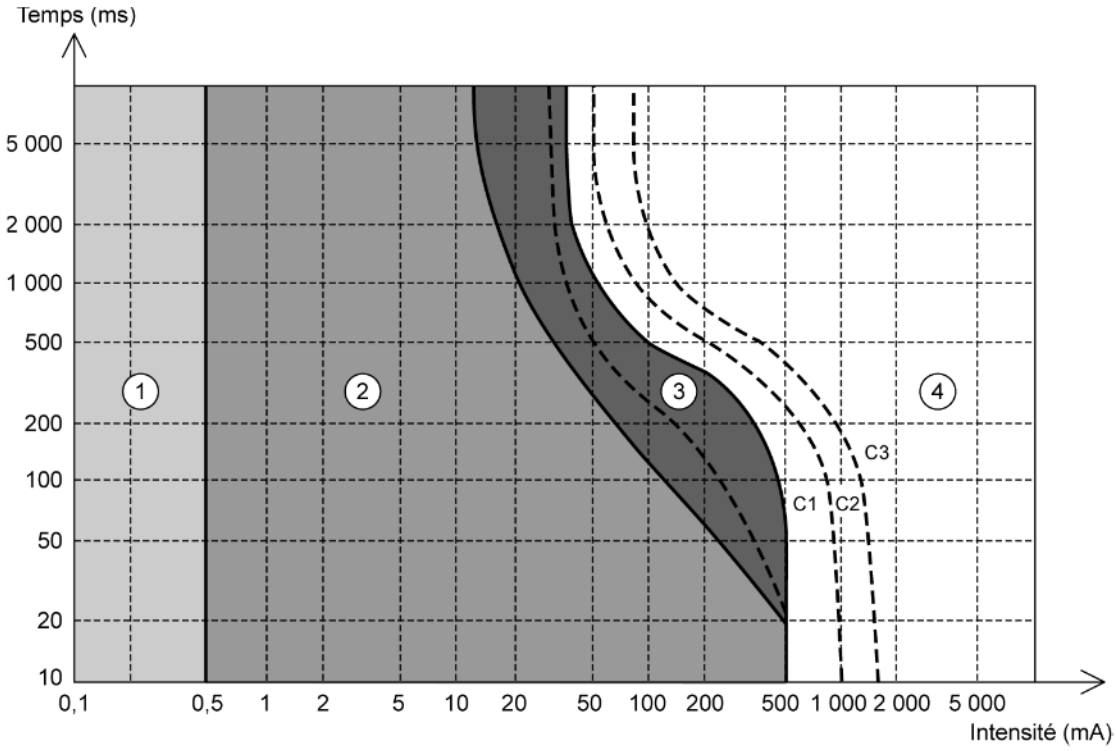


Figure 1.3 – Cycle zone temps/courant des effets du courant alternatif.

Zone 1 : habituellement aucune réaction. **Zone 2** : habituellement aucun effet pathophysiologique dangereux. **Zone 3** : habituellement aucun dommage organique (contractions musculaires, absence de fibrillation). **Zone 4** : probabilité de fibrillation augmentant jusqu'à 5 % (courbe C2), 50 % (courbe C3), plus de 50 % (au-delà de la courbe C3). **Courbe L** : courbe de sécurité sur laquelle sont basées les règles de la NFC 15-100.

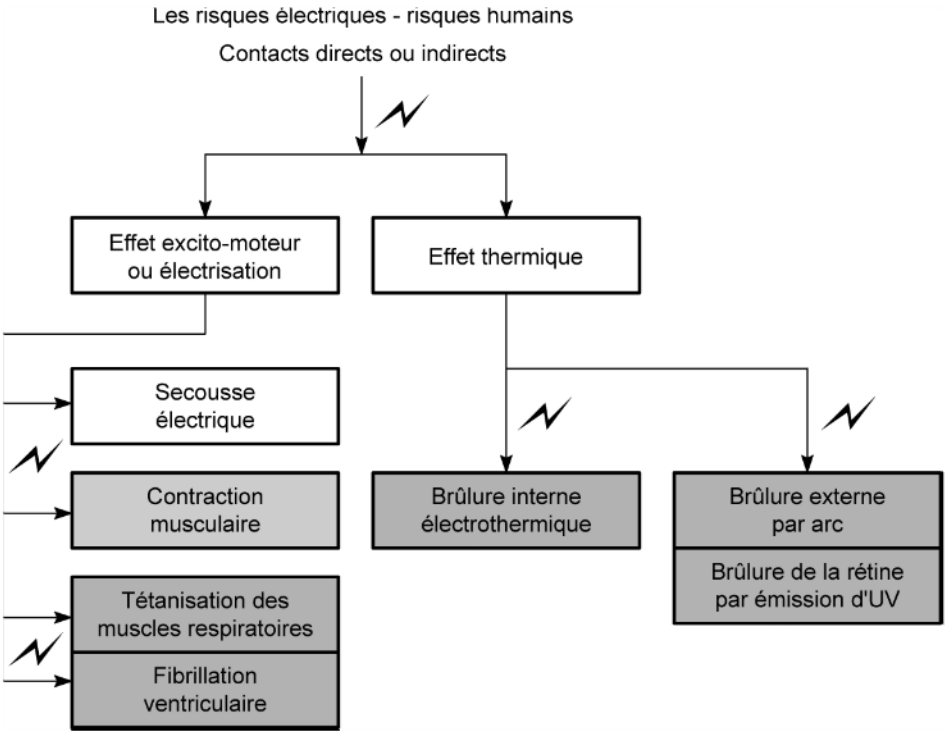


Figure 1.4 – Risques électriques en contacts directs et indirects.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

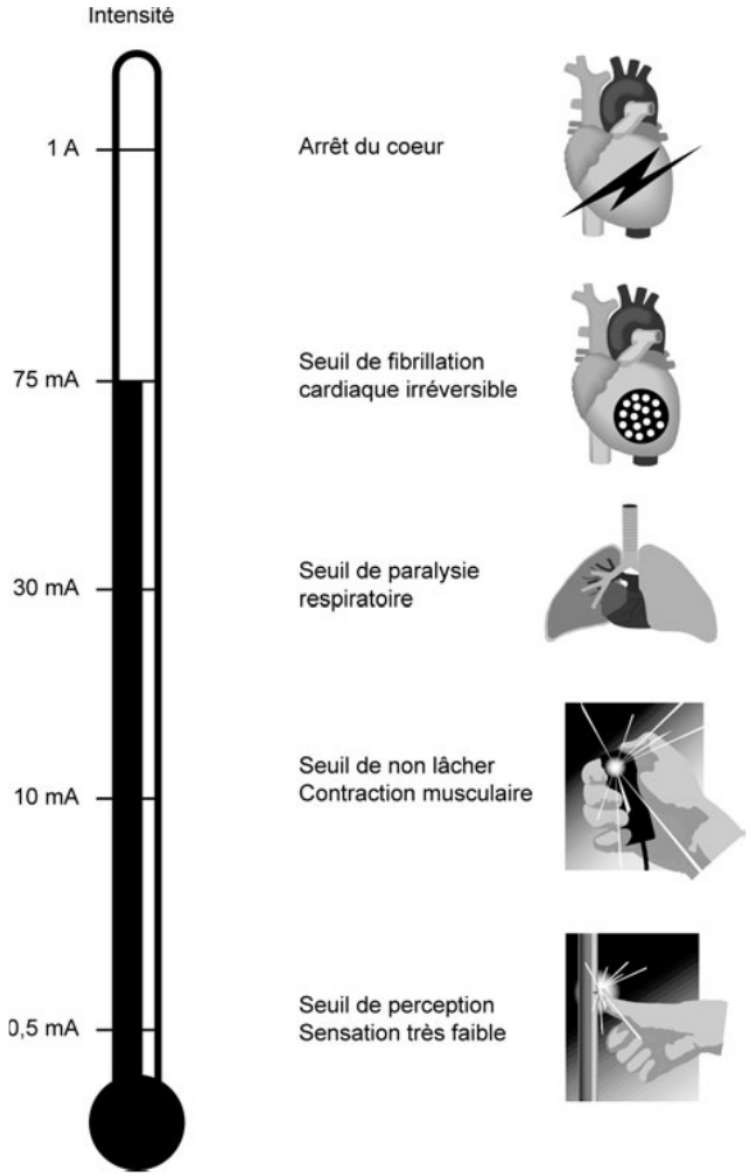


Figure 1.5 – Les effets du courant électrique sur les parties du corps humain.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Les différentes réactions physiopathologiques rencontrées lorsqu'un courant électrique traverse le corps dépendent de cinq facteurs mais certains autres ne sont malheureusement pas mesurables :

– l'intensité du courant ;
– la fréquence du courant ;
– le temps de contact ;
– le trajet du courant ;
– l'impédance du corps entre les deux points de contact.

1.6 Résistance du corps humain

Le corps humain est **conducteur**, le courant à même de le traverser est directement lié à la valeur de sa **résistance**.

Cette résistance, due essentiellement à la peau, **varie** pour chaque individu en fonction des paramètres suivants :

– la température de la peau ;
– la surface de pression de contact ;
– la tension de contact ;
– l'état d'humidité et de la sudation de la peau ;
– le temps de passage du courant ;
– l'état physiologique de la personne ;
– la morphologie de l'individu ;
– le trajet du courant dans le corps humain.

En pratique, on retiendra les valeurs suivantes de l'impédance du corps humain en fonction de l'environnement :

5 000 Ω (non mouillé)

2 500 Ω (mouillé)

1 000 Ω (immergé)

Les tissus du corps humain peuvent être représentés par une succession de résistances R et de réactances X, le tout constituant une impédance Z :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

L'impédance du corps humain Z résulte de la somme géométrique des impédances de la peau ou muqueuse aux points de contact et de l'impédance interne des tissus. La résistance du corps humain varie selon (*figure 1.6*) :

– le milieu ambiant ;
– le stress supporté ;
– l'état général des surfaces de contact…

Au-delà de 50 V, la peau peut être percée, et la résistance électrique chute au niveau de la résistance interne (milieu aqueux), soit 300 à 700 Ω.

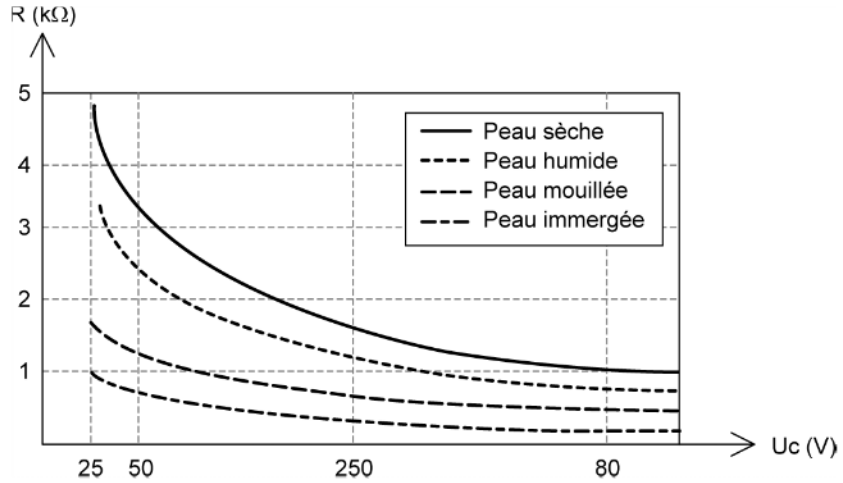


Figure 1.6 – Variation de la résistance du corps humain en fonction de la tension de contact et de l'état de la peau.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

1.7 Effets de la tension et de l'intensité conjuguées

Dans les conditions normales d'utilisation des installations électriques, lorsque l'on est soumis à des tensions de plus en plus élevées au niveau du contact et selon la nature du courant, les accidents encourus par les personnes ou par les biens sont statistiquement différents.
On constate les faits les plus marquants suivants :

– des brûlures de contact dues au port de bague, bracelet, etc.,
– des incendies,
– des explosions.

1.7.1 En courant alternatif

– En dessous de 50 V, absence d'accident mortel.
– Entre 50 et 500 V, on constate le plus grand pourcentage de fibrillation cardiaque.
– Pour des tensions de l'ordre de 500 à 1000 V, il y a principalement syncope respiratoire et brûlures.
– À partir d'environ 1000 V, brûlures internes de type hémorragique avec libération de myoglobine (blocage des reins).

1.7.2 En courant continu

– En dessous de 120 V, absence d'accident mortel.
– Entre 120 et 750 V (tensions peu répandues), on constate des effets d'électrolyse et des brûlures par effet Joule.
– À partir d'environ 750 V, les accidents entraînent surtout des brûlures internes et externes.

Tous les divers aspects du risque électrique et les gravités engendrées ont amené le législateur à créer des domaines de tension afin de définir ensuite la prévention à mettre en œuvre.

1.8 Domaines de tension

1.8.1 Les effets de la tension

Le début du processus d'électrisation n'est perceptible qu'à partir d'une certaine valeur de tension.
Un contact entre deux bornes d'une batterie de voiture (12 ou 24 V) n'occasionne aucune sensation au niveau du corps humain. Par contre, un même contact aux bornes d'une prise de courant (240 V) se traduira par une sensation douloureuse, voire un coma.
En fait, notre corps est protégé par la peau, qui représente une barrière physiologique s'opposant aux sensations de l'électricité.
L'augmentation de la tension appliquée au niveau de la peau entraîne la perforation de celle-ci.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

1.8.2 Tension limite conventionnelle de contact

C'est la valeur maximale de la tension de contact qu'il est admis de pouvoir maintenir indéfiniment dans des conditions spécifiées d'influences externes (décret n° 88-1056 ED123 p. 20).

■ **Condition BB1**

Tension limite conventionnelle de contact : 50 V.

■ **Condition BB2**

Tension limite conventionnelle de contact : 25 V.

■ **Condition BB3**

La tension limite conventionnelle de contact n'est pas définie.
L'alimentation de l'installation est réalisée en TBTS (12 V).

Tableau 1.3 – Les domaines de tension.

Domaines de tension		Courant alternatif Exemples en 50 Hz		Courant continu lisse[1]
Très basse tension	**TBT**	U ≤ 50 V	24 V	U ≤ 120 V
Basse tension A	**BTA**	50 < U ≤ 500 V	230 V-400 V	120 < U ≤ 750 V
Basse tension B	**BTB**	500 < U ≤ 1 000 V	690 V-1000 V	750 < U ≤ 1 500 V
Haute tension A	**HTA**	1 000 < U ≤ 50 kV	5,5 kV-20 kV	1 500 < U ≤ 75 kV
Haute tension B	**HTB**	U ≥ 50 kV	63 kV-400 kV	U ≥ 75 kV

1. Le courant continu lisse est celui défini conventionnellement par un taux d'ondulation non supérieur à 10 % en valeur efficace, la valeur maximale de crête ne devant pas être supérieure à 15 %. Pour les autres courants continus, les valeurs des tensions nominales sont les mêmes que pour le courant alternatif.

1.8.3 Loi d'Ohm

$$U = R \cdot I$$

U est la tension en **volts (V)**.
I est le courant en **ampères (A)**.
R est la résistance en **ohms (Ω)**.
La valeur de la tension dangereuse est obtenue en multipliant la valeur de la résistance du corps dans les conditions les plus défavorables en fonction de l'environnement par la valeur à partir de laquelle l'intensité du courant est dangereuse soit le courant de non lâché.
Soit respectivement **50**, **25** et **12 V**. Ces tensions sont appelées **tensions limites de sécurité**.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

2 • PRÉVENTION DES RISQUES ET HABILITATIONS

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

2.1 Moyens de protection contre les contacts directs

2.1.1 Généralités

Les dispositions de protection contre les risques de contacts directs ont pour but d'assurer la mise hors de portée de pièces nues sous tension, accessibles aux travailleurs. La protection peut être obtenue par l'un des trois moyens suivants :

– éloignement ;
– obstacles ;
– isolation.

On retiendra deux critères essentiels pour garantir la qualité de la protection :

– l'efficacité ;
– la permanence.

2.1.2 Éloignement

L'éloignement doit être suffisant pour prévenir le risque d'accidents par contacts directs ou rapprochement à l'aide d'objets que les travailleurs manipulent ou transportent.

■ Permanence

La permanence de cet éloignement doit être garantie contre tout risque de relâchement ou de chute par une résistance mécanique des pièces ou de leurs supports en rapport avec les contraintes auxquelles elles sont normalement exposées.

■ Distance

Les distances doivent être compatibles avec le matériel manutentionné.

2.1.3 Obstacles

■ Efficacité

La protection doit être assurée compte tenu des contraintes auxquelles sont soumis les obstacles par leurs :

– nature ;

– étendue ;
– disposition ;
– stabilité.

Constitution

Les obstacles sont constitués :

– soit de parois pleines ou percées de trous ;
– soit de grillage.

Tous les obstacles, coffrets d'appareillage, armoires de tableaux, cache-bornes de moteurs, portes en tôle ou en grillage dans les postes HT, doivent être maintenus en place et en bon état.
Important : la suppression des obstacles, quelle qu'en soit la classe de tension, ne sera réalisée que par des électriciens habilités.

Indice de protection procuré par les enveloppes (NFC 20-010)

Ils assurent la protection contre les contacts directs.
Les degrés minima de protection du matériel sont :

– I.P. 2x ou xxB en BT.
– I.P. 3x ou xxC en HT.

2.1.4 Isolation

Efficacité – Permanence

L'isolation doit être adaptée à la tension de l'installation et conserver à l'usage ses propriétés, eu égard aux risques de détérioration auxquels elle peut être exposée (protection des conducteurs et câbles).
On peut également rajouter une isolation sur des câbles nus.

Canalisations souples

Elles doivent être raccordées aux appareils mobiles de façon à exclure :

– toute flexion nuisible de l'isolant à l'entrée de l'appareil ;
– tout effort de traction ou de tension sur les conducteurs, à leur point de connexion.

Nota : sont considérés comme conformes à la réglementation :

– les baladeuses conformes à la NFC 71 008 d'un type non démontable et qui ont un indice de protection I.P. 45 (marquage obligatoire) ;
– les prolongateurs placés sur un tambour isolant équipés aux deux extrémités de connecteurs « **non démontables** » d'un indice I.P. 44.

Canalisations enterrées

Les canalisations enterrées sont signalées par un dispositif avertisseur (grillage) placé au minimum à 10 cm au dessus.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Elles doivent être convenablement écartées de toutes autres canalisations enterrées et doivent être pourvues de marques d'identification ; le parcours au sol doit être matériellement repéré (entrées bâtiments, changement de direction).
Le tracé doit être relevé sur un plan de masse de l'établissement.
Ces dispositions sont applicables quel que soit le domaine de tension.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

2.2 Moyens de protection contre les contacts indirects

2.2.1 Les différents moyens de protection

La protection contre les risques de contact indirect dans les installations alimentées par du courant alternatif peut être réalisée :

- en associant la mise à la terre des masses à des dispositifs de coupure automatique de l'alimentation ;
- par double isolation ou isolation renforcée ;
- par la séparation des circuits ;
- par l'utilisation de la très basse tension de sécurité (TBTS).

Les modalités pratiques de réalisation des différents types de mesures de protection sont définies par arrêtés.

2.2.2 Surveillance des installations

Une surveillance des installations électriques doit être assurée. L'organisation de cette surveillance doit être portée à la connaissance de l'ensemble du personnel.
Cette surveillance doit être opérée **annuellement** et aussi fréquemment que de besoin et provoquer, dans les meilleurs délais, la suppression des défectuosités et anomalies constatées (décret 88-1056).

2.2.3 Protection contre les brûlures

Un électricien intervenant sur une installation électrique peut par un geste malencontreux provoquer un court-circuit. Cet incident entraînera des brûlures dues à l'arc électrique et aux projections de matière en fusion.
Pour prévenir ce type d'accident et ses conséquences, il est obligatoire :

- d'utiliser des outils isolants ou/et isolés ;
- de protéger les circuits de mesure contre les surintensités : dispositifs à haut pouvoir de coupure, parasurtenseurs ;
- de porter des équipements de protection individuelle (EPI) telles que :
  - lunettes ou écrans faciaux anti-UV,
  - gants isolants adaptés à la tension,
  - casque,
  - vêtement à manches longues.

Nota : il est préférable de travailler hors tension sur une installation ou un équipement consigné (voir chapitre équipements de protection individuelle [EPI], extrait de la publication UTE 18-510).

2.3 Préventions et sécurisation des personnels

Extraits de la publication UTE C 18-510 :

2.3.1 Introduction

Articles du décret 88-1056 du 14 novembre 1988 importants pour les chefs d'établissement :

– Locaux réservés : art. 2.
– Appareils de mesures : art. 8.
– Dispositif de coupure d'urgence : art. 10.
– Différentes catégories de personnel : art. 46.
– Organisation : art. 47.
– Vérifications des installations électriques : art. 48.
– Circuits et installations de sécurité : arrêté du 10 novembre 1976

2.3.2 Publication UTE C 18-510

L'UTE C18-510 s'applique :

– aux ouvrages électriques soumis au :
  • décret 88-1056 du 14 novembre 1988,
  • A.M. du 26 mai 1978,
  • décret 82-167 du 16 février 1982 ;
– à tous les domaines de tension, y compris la TBT (S, P ou F) pour les prescriptions relatives à la protection contre les risques de brûlures ou de court-circuit.

Les prescriptions relatives à la prévention des chocs électriques ne s'appliquent pas aux installations des domaines :

– TBTS ou TBTP ;
– de TELECOM si U < 100 V.

2.3.3 Extraits importants

Avant toute intervention sur site, il faut respecter le protocole d'intervention et donc préparer celle-ci d'une façon même administrative.

■ Préparation de l'intervention

En toute rigueur, il faudra l'ensemble de ces documents dont on pourra trouver la définition dans le glossaire :

– Attestation de consignation pour travaux (ACT).
– Attestation de première étape de consignation.
– Autorisation de travail.
– Fiche de manœuvre.
– Instructions permanentes de sécurité (IPS).
– Avis de réquisition.
– Avis de fin de réquisition.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Attestation de séparation du réseau de distribution public HT.
– Demande de fin de séparation du réseau de distribution public HT.

■ Formation et habilitation

Pour pouvoir être habilité, le personnel doit avoir reçu :

– une formation relative à la prévention des risques électriques ;
– les instructions nécessaires pour le rendre apte à veiller à sa propre sécurité et à celle du personnel qui est placé éventuellement sous ses ordres.

□ Formation à la prévention des risques électriques

Cette formation a pour but de donner au personnel concerné, en plus de ses connaissances professionnelles déjà acquises, la connaissance des risques inhérents à l'exécution d'opérations au voisinage ou sur les ouvrages électriques et des moyens de les prévenir.

Elle comprend deux parties :

– une formation **théorique** aux risques électriques et à leur prévention ;
– une formation **pratique** dans le cadre du domaine d'activité attribué à l'intéressé assurant une bonne connaissance des installations et une étude des prescriptions de sécurité relatives aux opérations qui peuvent lui être confiées ainsi qu'au personnel placé éventuellement sous ses ordres.

Cette formation relève de la responsabilité de l'employeur qui peut :

– soit l'assurer avec ses moyens propres ;
– soit la confier à un organisme spécialisé.

□ Habilitation

C'est la reconnaissance, par son employeur, de la capacité d'une personne à accomplir en sécurité les tâches fixées.
L'habilitation n'est pas directement liée à la classification professionnelle ou hiérarchique. Elle est matérialisée par un document établi par l'employeur et signé par celui-ci et par l'habilité.

Domaine d'utilisation

L'habilitation est nécessaire notamment pour :

– accéder sans surveillance aux locaux réservés aux électriciens ;
– exécuter des travaux ou des interventions d'ordre électrique ;
– diriger des travaux ou interventions d'ordre électrique ;
– procéder à des consignations d'ordre électrique ;
– effectuer des essais, mesurages ou vérifications d'ordre électrique ;
– assurer la fonction de surveillant de sécurité.

Conditions d'habilitation

L'employeur doit s'assurer que les personnes à habiliter possèdent les connaissances suffisantes :

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– sur les dangers de l'électricité ;
– sur les règles de sécurité ;
– sur la conduite à tenir en cas d'accident ;
– sur les mesures de prévention vis-à-vis des autres risques liés à l'activité et à l'environnement de l'établissement.

Il doit également s'assurer que ces personnes :

– possèdent les aptitudes nécessaires à la réalisation des tâches visées par l'habilitation ;
– présentent un comportement compatible avec la bonne exécution de ces opérations.

☐ Tableau et symboles des habilitations

Tableau 2.1 – Les titres d'habilitation (INRS, UTE C18-510).

Opérations du domaine BT			Opérations du domaine HT	
B0	B0V		H0	H0V
B1	B1V	B1T	H1	H1V (T)
B2	B2V	B2T	H2	H2 (T)
BR interventions/mesurage/essais				
BC (consignation)			HC	
Hors tension	Travaux au voisinage	Travaux sous tension		

Première lettre

– B : ouvrage du domaine BT ou TBT.
– H : ouvrage du domaine HT.

Deuxième lettre

– R : le titulaire peut procéder à des interventions de dépannage, de raccordement, mesurages, essais, vérifications ; ce type d'habilitation ne peut être délivré que pour des ouvrages du domaine BT et TBT.
– C : le titulaire peut procéder à des consignations.
– T : le titulaire peut travailler sous tension.
– N : le titulaire peut effectuer des travaux de nettoyage sous tension.
– V : le titulaire peut travailler au voisinage d'installations du domaine indiqué.

Indice numérique

– 0 : personnel réalisant exclusivement des travaux d'ordre non électrique et/ou des manœuvres permises.
– 1 : personnel exécutant des travaux d'ordre électrique et/ou des manœuvres.
– 2 : personnel chargé des travaux d'ordre électrique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Règles de fonctionnement

L'habilitation d'un indice numérique déterminé entraîne la ou les habilitations d'indice inférieur exclusivement sur les ouvrages du même domaine de tension et pour une même nature d'intervention.
Par exemple : H2 entraîne H1 et H0, et B1 entraîne B0.

Habilitation BR

Elle entraîne l'habilitation B1. Elle permet à son titulaire de remplir les fonctions de chargé de consignation (C.C.) pour son propre compte et celui des exécutants qu'il dirige lors d'une intervention.

Habilitation BC ou HC

Elle n'entraîne pas l'attribution des autres types d'habilitation et réciproquement.
Nota : des habilitations spéciales non symbolisées peuvent être délivrées pour les besoins particuliers. Elles figureront de façon explicite sur le titre d'habilitation à la rubrique « autorisations spéciales » (ou « interdictions spéciales ») et sur la ligne « habilités spéciaux ».

☐ Titre d'habilitation

Il doit comporter :

- la codification symbolique (lettres et indices) sauf cas des habilitations spéciales ;
- la définition du champ d'application (domaines de tension et ouvrages) ;
- les opérations pour lesquelles le titulaire est habilité ;
- l'autorisation éventuelle de travailler au voisinage de pièces nues sous tension ;
- les limitations éventuelles à certains ouvrages ;
- les indications figurant à la rubrique « avis » ;
- la durée de validité si nécessaire.

☐ Validité du titre d'habilitation

Les habilitations pour les travaux sous tension (TST), c'est-à-dire comportant la lettre T (ou N pour le nettoyage) ne sont valables que pour l'année civile en cours. Les autres titres d'habilitations n'ont pas de durée limite de validité « imposée ».

☐ Renouvellement de l'habilitation

L'habilitation doit être révisée à chaque fois que cela s'avère nécessaire :

- mutation avec changement de dépendance hiérarchique ;
- changement de fonction ;
- interruption de la pratique pendant une longue durée ;
- restriction médicale ;
- modification importante des ouvrages ;
- évolution des méthodes de travail.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

□ Désignation du personnel

L'habilitation n'autorise pas, à elle seule, un titulaire à effectuer de son propre chef des opérations pour lesquelles il est habilité.
Il doit, être désigné par son employeur pour l'exécution de ces opérations.
L'affectation à un poste de travail peut constituer une désignation implicite.

■ Matériel de protection individuelle et collective

Le matériel de protection doit être conforme aux prescriptions de la réglementation et aux normes en vigueur quand elles existent.

Tout utilisateur de matériel de sécurité doit vérifier ce dernier avant tout emploi :

– Le matériel doit être en bon état.
– Le matériel doit être adapté aux interventions et aux travaux.

□ Équipements de protection individuelle (EPI)

Casque de protection

– Il doit être utilisé chaque fois qu'il y a risque de chute ou de heurt.
– Lors des mesurages en armoire sous tension.
– Il doit être conforme à la norme NF S 72 202.

Figure 2.1 – Casque de protection.

Gants isolants

– Ils doivent être adaptés à la tension des installations ou équipements sur lesquels sont effectués les travaux ou interventions.
– Ils doivent être vérifiés avant chaque emploi ; (ne pas présenter de trous ou de déchirures).
– Ils doivent être rangés dans les boîtiers ou sachets de protection.
– Ils doivent être conformes à la norme NFC 18 415.

Figure 2.2 – Gants isolants.

Écran facial ou masque anti-UV

Ils doivent être mis :

– lors de travaux au voisinage ;
– lors des étapes sous tension pendant les interventions ;
– lors des mesurages ;
– lors des MALT et CCT.

La conformité du matériel au fascicule de document S 77 100 est requise.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 2.3 – Écran facial.

Grimpettes ou étriers à grilles

– Les pointes des grimpettes pour poteaux bois doivent être acérées.
– Tous défauts des parties métalliques ou autres doivent entraîner une réparation ou le rebut.

La conformité du matériel à la norme NF S 71 012 est requise.

Outils isolants

– Ils doivent être adaptés à la tension des installations sur lesquelles on effectue les travaux ou interventions.
– Ils doivent être en parfait état.

☐ Matériel de protection collective

Tapis ou tabouret isolant

– Attention à la tension nominale des ouvrages ! L'isolation par rapport au sol de l'opérateur doit être assurée.
– Il faut se placer au milieu du tabouret ou du tapis.

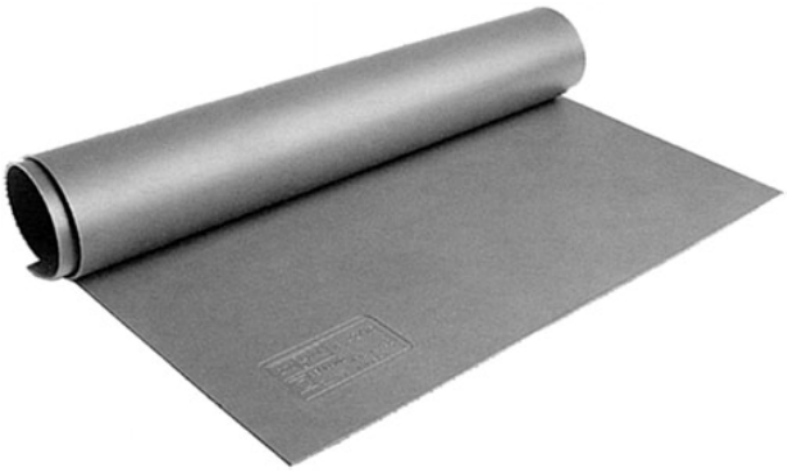


Figure 2.4 – Tapis isolant.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Lors de l'emploi d'un tabouret, s'assurer de la bonne fixation des pieds et de leur propreté.

La conformité du matériel à la norme NFC 18-420 est requise.

Vérificateur d'absence de tension (VAT)
à présent appelé détecteur de tension (DDT)

– Vérifier leur fonctionnement et les maintenir en bon état.
– Les appareils de mesurage ne sont pas des DDT/VAT, et vice versa.
– En BT les gants isolants sont obligatoires s'il y a risque de contact avec des pièces nues sous tension.

La conformité du matériel à la norme NFC 18-310 en BT et NFC 18-311 en HT est requise.

Pour assurer l'entretien périodique annuel des VAT, il faut :

– remplacer les piles ;
– vérifier le détecteur avant et après utilisation.

Figure 2.5 – DDT.

Dispositifs mobiles de mise à la terre
et en court-circuit (MALT et CCT)

Ils sont mis en place pour protéger le personnel contre :

– un renvoi de tension ;
– les surtensions atmosphériques ;
– les phénomènes d'induction.

Mise en œuvre :
MALT et CCT se font au plus près du chantier.
L'opérateur s'assurera du bon état du dispositif.
Ce dispositif doit être d'un modèle spécialement étudié pour que l'opérateur reste isolé des parties actives (utilisation de perche isolante adaptée à la tension).

L'opérateur doit, dans l'ordre :

– fixer l'étau de terre en assurant un bon contact :
  • aux masses existantes sur le lieu de travail,
  • ou à un piquet métallique enfoncé dans le sol ;
– dérouler les conducteurs du dispositif ;
– fixer les pinces de contact sur les conducteurs à l'endroit où a lieu la VAT, avec des outils ou perches isolantes (en BT des pinces peuvent être placées à la main si l'opérateur porte des gants isolants).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Entretien et vérification périodique des dispositifs MALT et CCT :

Tous les ans :

– graisser la visserie des étaux et des pinces ;
– remplacer le câble lorsque le contrôle visuel du câble de cuivre n'est plus possible au travers de la gaine ;
– reprendre les connexions si nécessaire (brins coupés) ;
– vérifier le serrage des connexions.

Perches :
Il existe aussi des perches de manœuvre et des perches de sauvetage celles-ci doivent être entretenues, appropriées à la tension de service et en bon état.

Balisage des zones :
Le repérage des zones de travail sur et autour des ouvrages lors de travaux et interventions nécessite un balisage.
Les indications et divers signaux doivent être placés à des emplacements adéquats par un chargé de travaux ou un chargé d'interventions.
L'entrée dans une zone de travail doit être clairement délimitée.

Ce balisage est réalisé par :

– des barrières ;
– des banderoles ;
– des pancartes.

Écrans protecteurs, nappes :
Lors des travaux ou interventions au voisinage de pièces nues sous tension, la pose d'écrans protecteurs ou dispositifs similaires est nécessaire.

■ Manœuvres – Mesurages – Essais – Vérifications

Le présent document regroupe les prescriptions de sécurité applicables à des opérations concernant les électriciens (manœuvres, mesurages, essais, vérifications) et les non-électriciens (manœuvres d'exploitation ou d'urgence).

□ Manœuvres

Définitions

Opérations conduisant à un changement de la configuration électrique :

– d'un ouvrage ;
– d'une installation ;
– de l'alimentation d'un équipement.

Trois types de manœuvres sont définis :

– les manœuvres de consignation et de déconsignation ;
– les manœuvres d'exploitation ;
– les manœuvres d'urgence.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Manœuvres de consignation et de déconsignation

Elles sont classées en deux groupes suivant leur but final :

– les manœuvres ayant pour but la consignation d'un ouvrage électrique, quel que soit le type de travaux, électriques ou non, doivent être réalisées sous la responsabilité d'un chargé de consignation ;
– les manœuvres ayant pour but la consignation d'une machine ou d'un appareil, pour travaux non électriques sur les parties non électriques sont à définir par consigne, ou par une instruction permanente de sécurité (IPS).

Lors d'opérations complexes ou d'opérations nécessitant un ordre de succession rigoureux des organes de manœuvres, il est recommandé de faire exécuter ces manœuvres par un chargé de consignation.

Dans le cas où les manœuvres sont à exécuter dans un local ou un emplacement d'accès réservés aux électriciens, le personnel devra être habilité en tenant compte éventuellement du voisinage.

Manœuvres d'exploitation

Elles ont pour but :

– la modification de l'état électrique d'un réseau ou d'une installation dans le cadre du fonctionnement normal ;
– la mise en marche, le réglage ou l'arrêt d'un équipement y compris le réarmement d'un relais thermique ;
– la connexion ou la déconnexion de matériels ou équipements amovibles prévus pour être connectés ou déconnectés sans risque (prises de courant et connecteurs BT…).

Le personnel doit être qualifié ou avoir reçu une consignation, être habilité ou non suivant le type d'appareillage à manœuvrer, sa complexité et les risques inhérents à l'opération.

Une habilitation sera indispensable pour manœuvrer les appareils situés dans les locaux d'accès réservés aux électriciens, il sera éventuellement tenu compte des risques liés au voisinage de pièces nues sous tension accessibles et dans ce cas les habilitations minimums seront B1V (BT) et/ou H1V (HT).

Manœuvres d'urgence

Elles ont pour but la sauvegarde des personnes et des biens ; elles doivent pouvoir être exécutées par toute personne présente sur les lieux, par action sur un dispositif de coupure d'urgence.

☐ Mesurages

Prescriptions générales

Le personnel devra être habilité en tenant compte de l'existence éventuelle de pièces nues sous tension dans le voisinage.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Compte tenu des risques très importants liés à ces opérations, le personnel effectuant des mesurages doit utiliser des équipements de protections individuelles appropriés (EPI), tels que :

– gants isolants, tapis ou tabouret isolant pour éliminer les contacts fortuits ;
– lunettes ou écran facial anti-UV pour limiter les conséquences d'un court-circuit ;
– casque, vêtement à manches longues…

D'autre part, il est impératif de sélectionner rigoureusement le calibre à utiliser (appareils à calibres multiples), d'utiliser du matériel normalisé adapté au type de mesurage et aux tensions qui peuvent être rencontrées et de vérifier le bon état des appareils, des accessoires et du matériel de protection (matériel devant par construction être résistant aux erreurs de gammes de mesures).

Mesurages sans ouverture de circuit

L'utilisation de voltmètres, de pinces ampèremétriques, pinces homopolaires, de boîtes à bornes d'essais, nécessite que l'opérateur soit habilité 1 minimum et travaille soit sur instructions, soit sous la direction d'un chargé de travaux ou d'un chargé d'interventions.
L'utilisation d'oscilloscopes ou d'appareils similaires nécessite l'intervention d'une personne habilitée BR, ou habilitée B1 sous la direction d'un chargé de travaux ou d'un chargé d'interventions.

Mesurages nécessitant l'ouverture de circuit

Ils consistent généralement à insérer dans un circuit des appareillages plus ou moins complexes, tels que shunts, transformateurs d'intensité, wattmètres… On appliquera pour ces mesurages la procédure des « interventions BT » ou celle des « travaux hors tension », voire celle des « travaux au voisinage ».

Mesurages de grandeurs électriques en HT

Ils doivent être effectués en respectant la procédure des « travaux hors tension », ou celle des « travaux sous tension », en tenant compte, si nécessaire, du voisinage.

□ Essais

Prescriptions générales

Le chargé d'essais est désigné par l'employeur pour assurer la direction effective des essais. Il est chargé de prendre les mesures de sécurité nécessaires et de veiller à leur application.
Ses fonctions correspondent à celles d'un chargé de travaux ou chargé d'interventions, il est donc habilité avec indice 2 ou la lettre R.
Les protections individuelles doivent être adaptées aux essais.

Essais comportant exclusivement des mesurages hors tension

Ils s'effectuent suivant la procédure des travaux hors tension, ce qui nécessite la consignation de l'ouvrage. Toutefois, pour certains essais, le chargé d'essais pourra

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

décider de ne pas conserver les mises à la terre et en court-circuit (mesures d'isolement par exemple).

Essais avec alimentation normale

Suivant les cas, on appliquera les procédures des travaux sous tension, ou des travaux hors tension et des manœuvres, ou des interventions BT en tenant compte, si nécessaire dans les deux derniers cas, des problèmes liés au voisinage.

L'ouvrage en essai reste sous la responsabilité du chargé d'exploitation ou de l'employeur. Le chargé d'essais doit recevoir les documents nécessaires pour réaliser les essais (ACT, APEC, AT).

Lorsque des essais de durée limitée sont effectués avec une alimentation extérieure (essais diélectriques, de continuité…), il n'est pas nécessaire de passer au régime de réquisition mais les organes de séparation de l'alimentation normale doivent être condamnés.

Essais sous tension avec alimentation extérieure autonome

Ces essais sont réalisés sous le régime de réquisition des ouvrages concernés.

Ce régime de réquisition (R.R.) nécessite la séparation totale de l'ouvrage de ses sources normales d'alimentation. L'ouvrage est placé sous la responsabilité d'un chargé de réquisition, habilité C, qui doit disposer de toutes les attestations de consignation nécessaires (ACT, APEC) avant de placer l'ouvrage en état de réquisition. Il remet ensuite l'avis de réquisition au chargé d'essais.

Essais en laboratoire ou sur plates-formes d'essais

Le personnel doit :

- être désigné individuellement ;
- disposer des protections individuelles personnelles en bon état ;
- posséder une IPS indiquant les modes opératoires et les mesures de sauvegarde ;
- être habilité en conséquence.

Nota : toutefois, du personnel non habilité peut être autorisé à accéder à l'emplacement sous réserve d'avoir été instruit des consignes à respecter, d'être surveillé en permanence par une personne compétente et de ne participer à aucun essai.

Les locaux ou emplacements doivent être clairement délimités par le chef d'établissement.

Ils doivent également comporter des points d'alimentation en énergie électrique repérés par une plaque spécifiant la valeur et la nature de la tension. En BTA, ces points doivent être équipés d'un témoin lumineux de présence tension et éventuellement d'absence de tension si le degré I.P. est inférieur à I.P. 2X.

Les appareils de mesure portatifs à main ainsi que les câbles souples doivent être parfaitement isolés et adaptés à la tension. Les conducteurs de raccordement doivent comporter un marquage indélébile de la section et de la tension nominale.

La protection contre les contacts indirects doit être réalisée pour les matériels en essai.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Les raccordements des canalisations mobiles aux installations fixes doivent présenter un degré I.P. 2X minimum en BTA si le courant d'emploi est au maximum de 16 A. Au-delà, une consigne doit être affichée.
Pour prescrire le détail et l'ordre des opérations à effectuer tant lors de la mise en place des canalisations électriques mobiles qu'au moment de leur démontage, cette consigne doit préciser, notamment, que toute intervention sur les parties actives des matériels soumis à l'essai ne doit être opérée qu'en dehors de la présence de tension.
Dispositions particulières à la BTB et la HT :

- La délimitation matérielle de l'emplacement est réalisée par des cloisons, écrans, barrières.
- Des dispositifs d'avertissement graphiques doivent être placés à l'extérieur.
- Chaque accès doit être équipé d'une lampe rouge allumée avant la mise sous tension et pendant l'essai.
- En HT, le témoin lumineux de présence tension doit être de type pulsé, complété par un dispositif sonore annonçant la mise sous tension.

□ Vérifications

Pour effectuer des vérifications, on applique les prescriptions des mesurages ou des essais. Le personnel doit être titulaire d'une habilitation d'indice 1 ou R minimum.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

3 • NORMES ET ACCESSOIRES DE SÉCURITÉ ADAPTÉS À LA MESURE

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Définitions

Sécurité : concerne la sécurité de l'opérateur vis-à-vis des dangers potentiels de l'utilisation des appareils de mesures.

Protection : concerne la protection de l'appareil de mesure, n'est pas synonyme de sécurité.

Dangers : toute action de mesurages peut représenter un risque de danger.

3.1 Responsabilités

Nous sommes tous concernés par la sécurité.

En cas de problème dû au non respect des normes de sécurité, les responsabilités du chef d'établissement, du prescripteur, et des utilisateurs peuvent être engagées.

Les Comités d'Hygiène et Sécurité (CHS) ont pour mission de veiller à la sécurité des installations électriques.

■ Normalisation

On distingue trois niveaux :

– France : **UTE** (Union technique de l'électricité), normes et documents NFC, UTE C, NF EN
– Europe : **CENELEC** (Commission européenne de normalisation électrique), normes et documents EN, HD, CECC.
– Mondial : **IEC/CEI** (Commission électrotechnique internationale), normes et documents IEC, IECEE, IECQ, CEE.

Protection contre les dangers potentiels liés à l'utilisation d'un appareil de mesurage :

Danger de choc électrique
Danger lié au feu
Danger d'incertitude
Danger de blessure
Danger d'utilisation de rayons

} Norme **EN 61010** ou **CEI 1010** ou **CEI/EN 61010**

3.2 Exigences réglementaires

3.2.1 En vigueur depuis le 1er janvier 1996

Directive basse tension (DBT) 73/23/CEE & 93/68/CEE concernant la sécurité des personnes.

Décret du droit français 95/08/BT & 92 587/CEM.

Les produits doivent obligatoirement être conformes à : 93/68/CEE, 89/336/CEE, 92/31/CEE.

Concernant la sécurité (entre autres) : CEI 348 et CEI 414.

Tous les appareils mis sur le marché (vendus ou offerts) « ne doivent pas générer de perturbations électromagnétiques pouvant gêner d'autres appareils », « ne doivent pas être perturbés par des perturbations électromagnétiques émises par des appareils ou installations (non susceptibilité) », « doivent compter le marquage CE qui atteste de la conformité aux normes en vigueur (CEM+BT) ».

3.2.2 En vigueur depuis 1er janvier 1997

Nouvelle norme concernant les appareils de mesure électroniques, **CEI 1010-1** (généralité), vient compléter et remplacer la norme **CEI 348**.

Pour les appareils type ampèremètres et voltmètres monofonction, les indicateurs analogiques, etc., CEI 414 est provisoirement maintenu.

Les appareils doivent toujours comporter le marquage CE.

3.2.3 En vigueur depuis le 1er décembre 1998

Les normes CEI 348 et CEI 414 et CEI 1010 sont définitivement abandonnées et remplacées par une norme unique soit : **EN 61010 ou CEI 61010**.

Les appareils doivent comporter le marquage CE attestant à ce jour des nouvelles dispositions normatives et autorisant la libre circulation des produits sur le marché européen.

Remarque

Le marquage CE indique la conformité aux normes, mais n'est aucunement une marque de qualité.

■ Trois normes à retenir

□ Généralités

CEI 61010-1 : comprenant les appareils de mesurages électriques et électroniques.

□ Prescriptions particulières

CEI 61010-2-032 : comprenant les pinces ampèremétriques « tenues à la main ».

CEI 61010-2-031 : comprenant les accessoires de sécurité, tels que les cordons de raccordement, les sondes passives, etc.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

3.3 Obligations de chacun

3.3.1 Constructeur

Informe l'utilisateur, à l'aide de marquage, de symboles et d'un manuel dans la langue de l'utilisateur (notice de fonctionnement).
Respecte les règles de construction qui assure protection des utilisateurs contre :

– les chocs électriques ;
– les risques mécaniques ;
– les risques thermiques ;
– les risques de propagation du feu.

3.3.2 Utilisateur

Lit les informations du constructeur.
Utilise le matériel dans les conditions définies par le constructeur : les réseaux électriques, les types de locaux, l'humidité, la température, l'altitude.
Les aspects normatifs de la CEI 61010-1. Cette norme définit principalement :

– la tension assignée par rapport à la terre (phase/terre) ;
– la catégorie de surtension ;
– le degré de pollution ;
– la classe de protection ou classes d'isolement :
  - classe 1 : borne de terre,
  - classe 2 : double isolation,
  - classe 3 : circuits qui ne sont pas sous tension dangereuse,
  - (< 30 Vac ou 60 Vdc en condition normale),
  - (< 50 Vac ou 120 Vdc en condition de 1er défaut).

3.4 Définition des termes figurant dans la norme CEI 61010-1

3.4.1 Appareil de classe 1

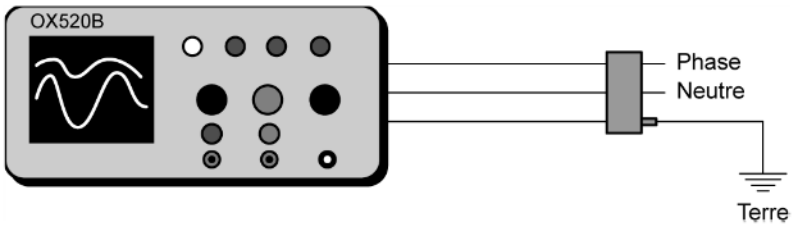


Figure 3.1 – Pratique de la classe 1 : appareil relié à une terre de protection.

Avec un oscilloscope de classe 1, pour réaliser une mesure flottante sur les trois phases du secteur par exemple, il est nécessaire d'intercaler un transformateur d'isolement ou de couper la terre, ce qui est **strictement interdit** !

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

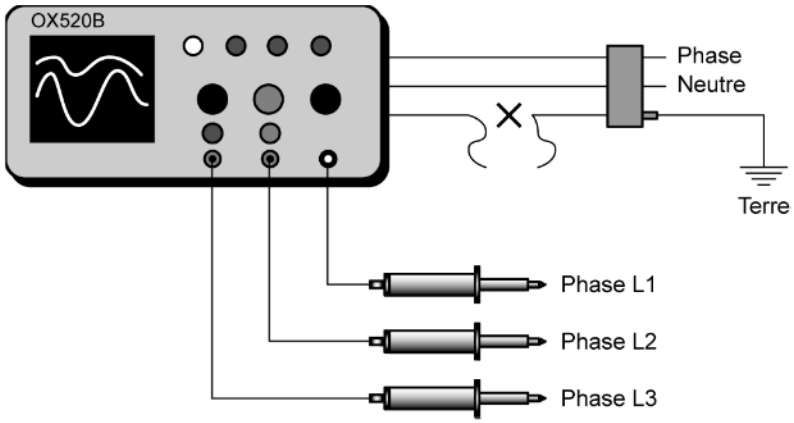


Figure 3.2 – Pratique de la classe 1 : interdiction de couper le PE.

Dans cette configuration l'oscilloscope est porté au potentiel de l'une des phases et ne peut garantir la sécurité de l'opérateur, la liaison à la terre en SLT type TT étant coupée.

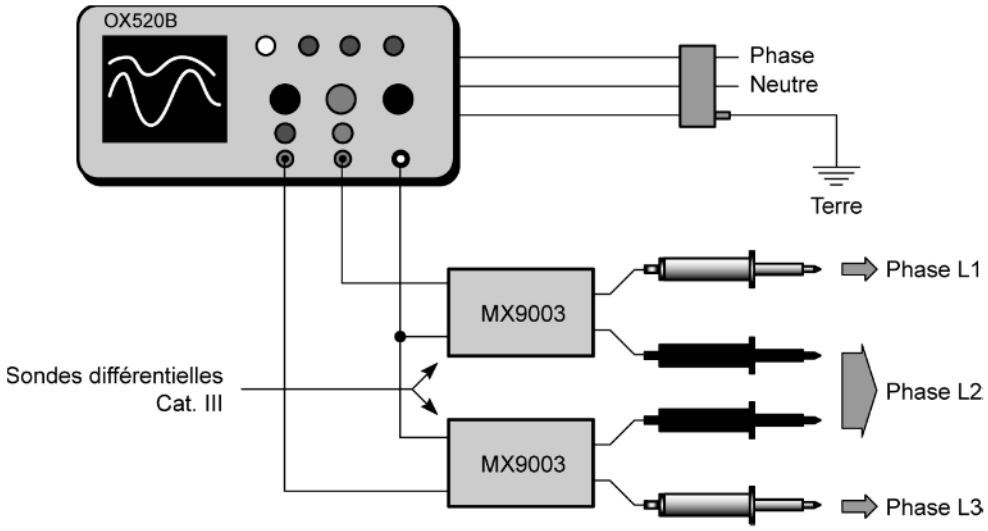


Figure 3.3 – Pratique de la classe 1 : solution alternative : utilisation de sondes différentielles isolées.

Une sonde différentielle isolée présente une forte impédance sur les entrées + et – ainsi qu'une atténuation allant jusqu'à 200 fois.

Le potentiel de la phase sera donc limité à une valeur non dangereuse car inférieure à 50 V.

Bien que cette solution soit réglementaire, un risque est conservé en cas de mauvais câblage de la sonde.

La sécurité est assurée par la terre de protection, classe 1.

Les entrées différentielles permettent de se relier sans référence de masse, la séparation totale des circuits de mesure évite les courants de circulation de masse, assure une protection avec mode commun > 500 V, grande dynamique de sensibilité 10 mV à 200 V/div, la bande passante de l'oscilloscope est préservée, etc.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

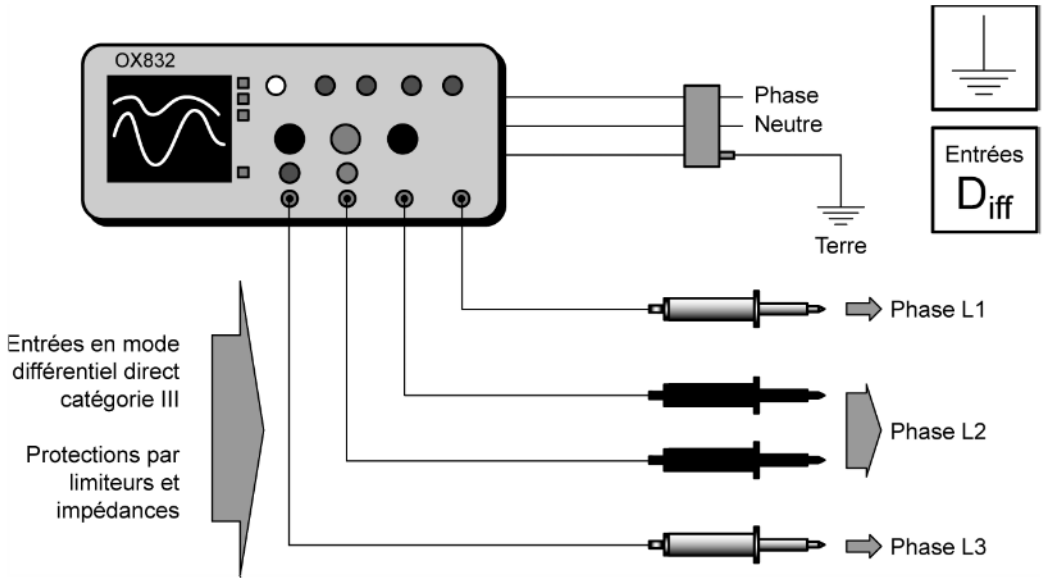


Figure 3.4 – Pratique de la classe 1 : solution alternative : utilisation d'un oscilloscope à entrées différentielles.

■ Avantages de l'oscilloscope différentiel

Entrées + et – à haute impédance en mode différentiel.
Correspond à un atténuateur double différentiel sur chaque entrée CH1 et CH2.
Le point froid d'une entrée asymétrique n'existe plus on se retrouve avec deux points chauds (+ et –).
Utilisation possible de sonde atténuatrice.

■ Amplificateur différentiel : élimine les tensions de mode commun

Fonctionne en mode normal en toute sécurité.
L'entrée non utilisée n'est pas mise à la masse mais laissée ouverte.
Le point froid correspond au potentiel de masse.

■ Avantages de l'oscilloscope différentiel par rapport à la sonde différentielle

Pas besoin de pile pour l'alimentation auxiliaire de la sonde (autonomie de la pile faible entre 20 et 50 h) avec une sonde risque de danger quand la pile est déchargée car dans ce cas l'indication de tension est erronée.
Pas de facteur de correction ×10 ou × 20 ou ×100 : l'oscilloscope permet une lecture directe de la tension mesurée (jusqu'à 200 V/div).
Toutes les positions de l'atténuateur de l'oscilloscope sont utilisables.
L'oscilloscope offre une bande passante supérieure avec un dépassement (*overshoot*) plus limité que celui de la sonde. Comparaison avec l'association d'un oscilloscope (non différentiel) et d'une sonde différentielle de tension :

– Bande passante d'un oscilloscope non différentiel : 20 MHz.
– Bande passante de la sonde différentielle de tension additionnelle : 15 MHz.
– Bande passante résultante de la sonde raccordée à l'oscilloscope : 12,5 MHz.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Une sonde peut être plus bruitée sur les signaux faibles car une forte atténuation est nécessaire pour couvrir toute la plage de mesure avec une tension résiduelle plus forte : pas de mesure sur des faibles signaux.

3.4.2 Appareillage de classe 2

Pratique de la classe 2 symbolisée par son double carré : ⧈.

Si un défaut électrique apparaît, il ne peut être évacué par la terre de protection (inexistante en classe 2). Pour éviter se problème et tout risque de danger en cas de défaut interne et externe lié à l'opérateur, il est prévu un niveau de protection supplémentaire dans le cas d'un oscilloscope, il doit être totalement et doublement isolé de l'alimentation réseau et des entrées de mesures.

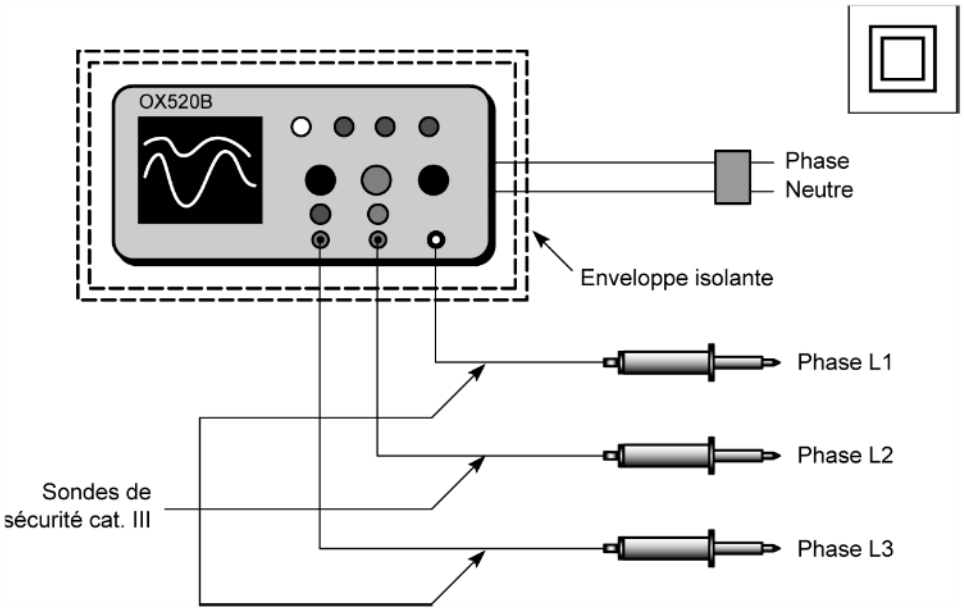


Figure 3.5 – Pratique de la classe 2 : appareil double isolation, non relié à une terre de protection

Catégorie de surtension I : appareils alimentés par un transformateur d'isolement ou par batteries.

Catégorie de surtension II : appareils domestiques ou de laboratoires branchés sur des prises électriques 2P+T normalisées 230 V tels que les réfrigérateurs, les téléviseurs, les oscilloscopes, les alimentations stabilisées, etc.

Catégorie de surtension III : installations industrielles (moteurs, machines…) ou les circuits à l'entrée d'un bâtiment (cage d'escalier, ascenseur…).

Catégorie de surtension IV : poste de distribution EDF, lignes aériennes et certains équipements industriels (alternateurs).

3.4.3 Catégorie de surtension

Elle correspond à la classification des parties d'une installation (immeuble, école, usine, etc.) ou de circuits (réseaux électriques, appareillages…) suivant les limites

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

normalisées pour les surtensions transitoires (foudre arrêt d'un moteur, d'un transformateur…) en fonction de la tension nominale du réseau par rapport à la terre.

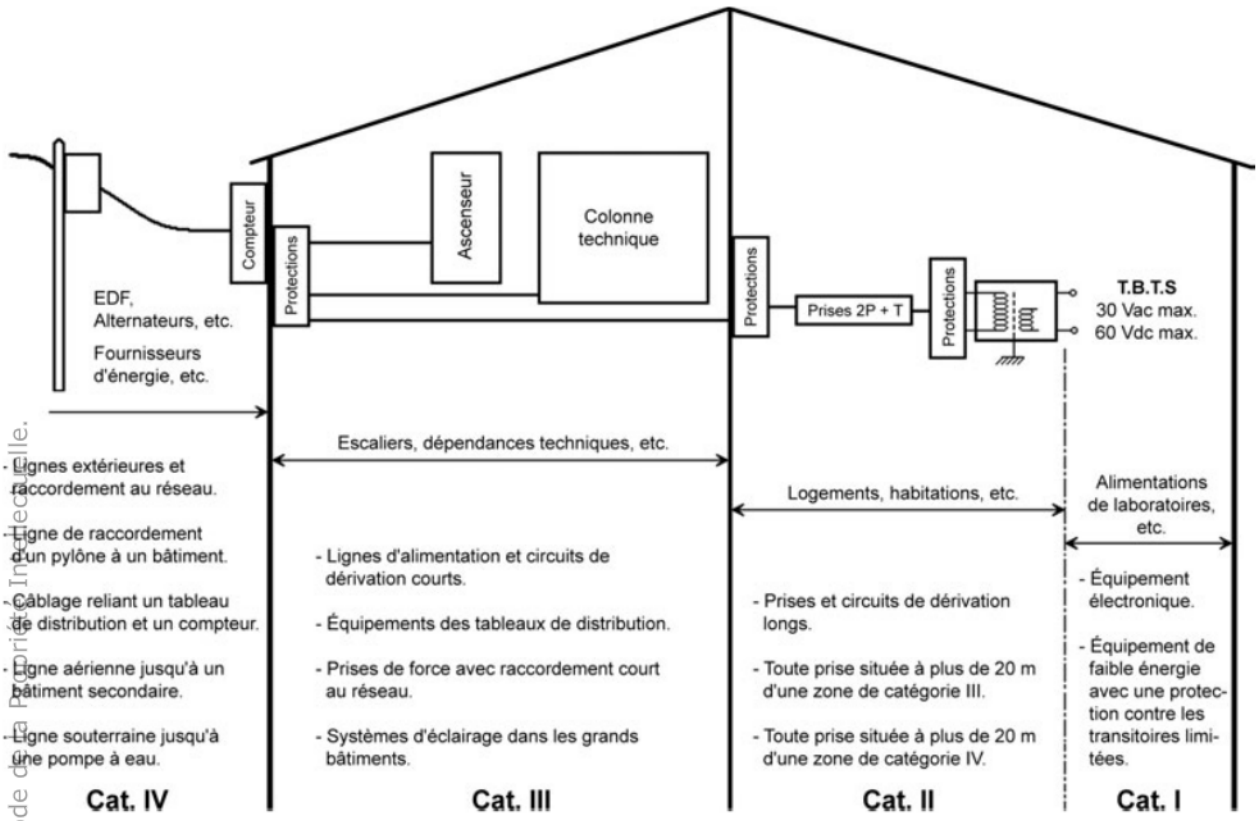


Figure 3.6 – Catégorie de surtension

3.4.4 La tenue aux chocs électriques

Elle est définie dans le *tableau 3.1* selon les catégories de surtensions en fonction des tensions alternatives assignées phase/terre.

Tableau 3.1 – Tenue aux chocs électriques en fonction des 4 catégories de surtensions.

V (AC ou DC de l'installation)	Tension de tenue au choc par catégorie d'installation			
	Cat. I	Cat. II	Cat. III	Cat. IV (en cours de normalisation)
50	330	500	800	1 500
100	500	800	1 500	2 500
150	800	1 500	2 500	4 000
300	1 500	2 500	4 000	6 000
600	2 500	4 000	6 000	8 000
1 000	4 000	6 000	8 000	12 000

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Exemple sur quelques appareils mis en situation

Les illustrations suivantes mettent en évidence des cas concrets d'utilisation d'appareils de mesures et des catégories de surtension à respecter suivants les utilisations indiquées ci-dessous :

Le multimètre : *figure 3.7*.

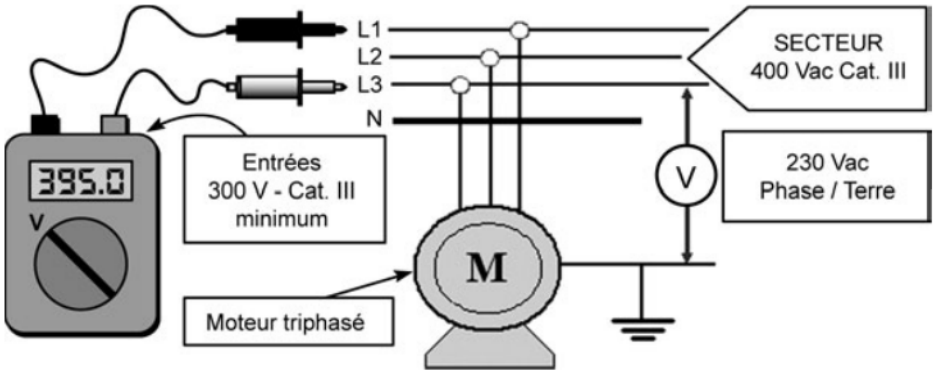


Figure 3.7 – Le multimètre et ses cordons en milieu industriel.

Le multimètre et ses cordons doivent être au minimum :

– Tension assignée : 300 V par rapport à la terre (selon tableau CEI 61010).
– Catégorie de surtension III, pour un régime de neutre TT (V1 = V2 = V3 = 230 Vac).

Le multimètre et ses cordons en milieu domestique : *figure 3.8*.

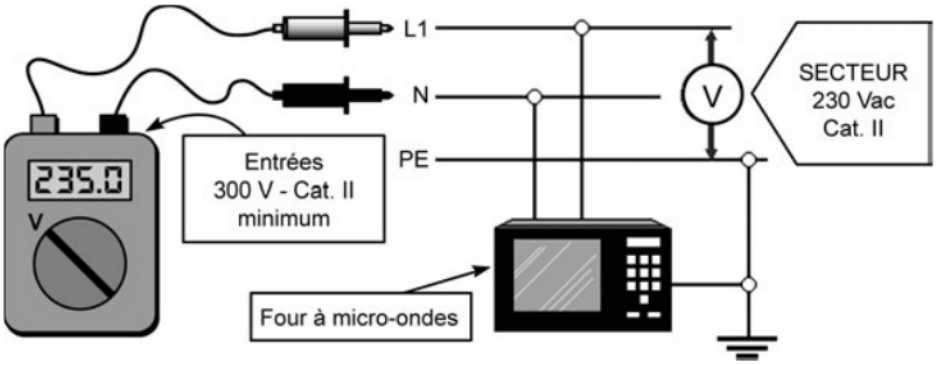


Figure 3.8 – Le multimètre et ses cordons en milieu domestique.

Le multimètre et ses cordons doivent être au minimum :

– Tension assignée : 300 V par rapport à la terre (selon tableau CEI 61010).
– Catégorie de surtension II.

Le multimètre et ses cordons en TBTS : *figure 3.9*.

Le multimètre et ses cordons doivent être au minimum :

– Tension assignée : 50 V par rapport à la terre (selon tableau CEI 61010).
– Catégorie de surtension I.

La pince ampèremétrique raccordée à un multimètre : *figure 3.10*.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

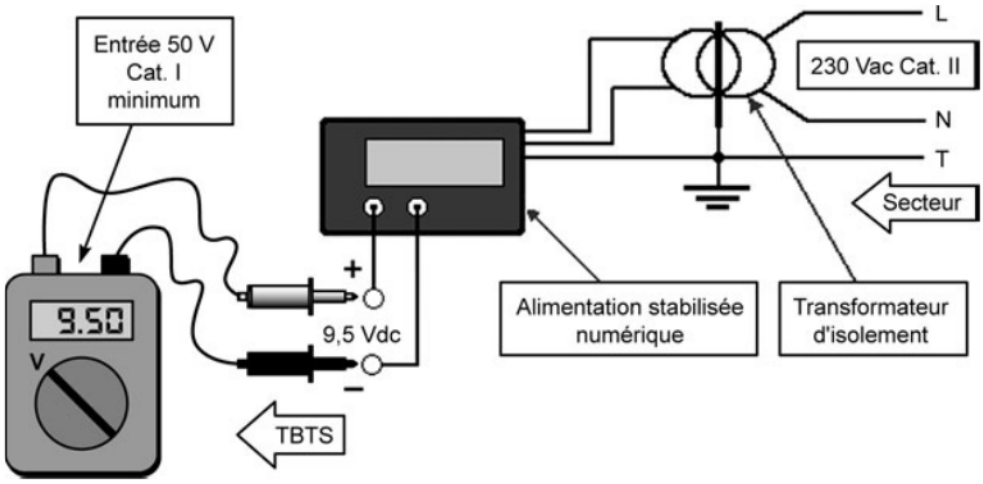


Figure 3.9 – Le multimètre et ses cordons en TBTS.

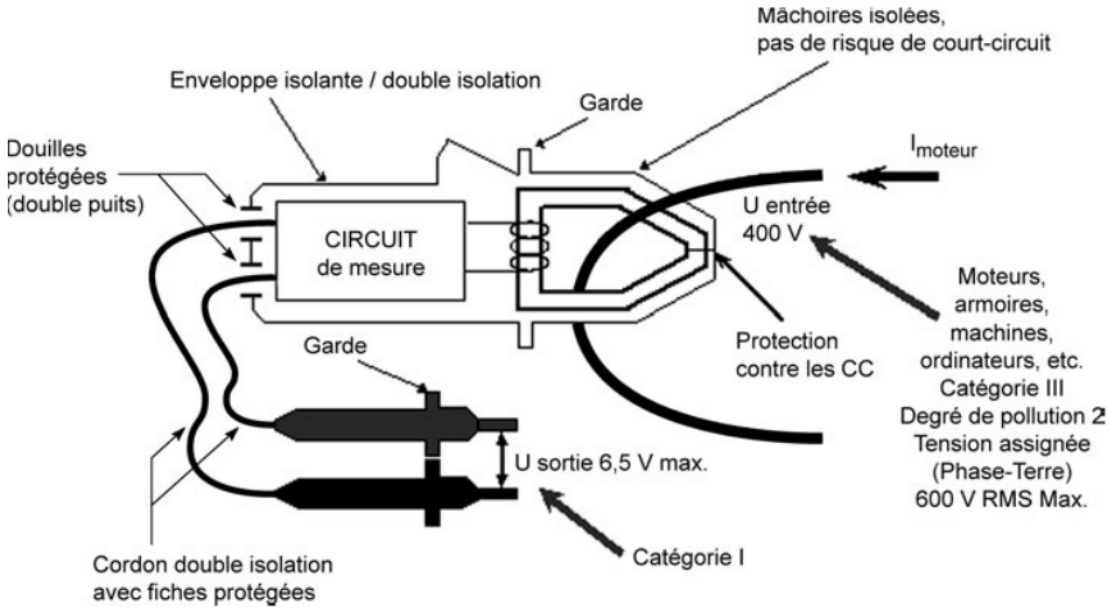


Figure 3.10 – Pince ampèremétrique et multimètre.

3.4.5 Le degré de pollution

Classification d'un micro-environnement utilisé pour évaluer les distances dans l'air nécessaires pour assurer un bon isolement.
Il définit le micro environnement à proximité des conducteurs.

■ Degré de pollution 1

Pas de pollution ou pollution sèche non conductrice, salle climatisée régulée en température et humidité. Il est utilisé pour l'intérieur des appareils étanches ou coffrets.

■ Degré de pollution 2

Normalement, pollution non conductrice ou pollution occasionnelle. Environnement dans lequel on peut s'attendre à une conductivité temporaire provoquée par la

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

condensation et locaux couverts, temporairement non chauffés (cas par exemple de salles de cours).

■ **Degré de pollution 3**

Pollution conductrice dans le cadre d'un environnement imprévisible (à l'extérieur, espace non couvert par exemple).

3.4.6 Les distances dans l'air

C'est la distance la plus courte entre deux parties conductrices pour assurer un bon isolement.

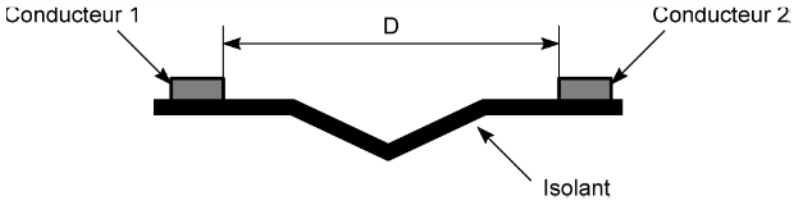


Figure 3.11 – Illustration de la distance dans l'air assurant la garantie d'un bon isolement.

3.4.7 La ligne de fuite

C'est la distance la plus courte *Lf* mesurée le long de la surface d'un isolant.

$$Lf = a + b + c + d$$

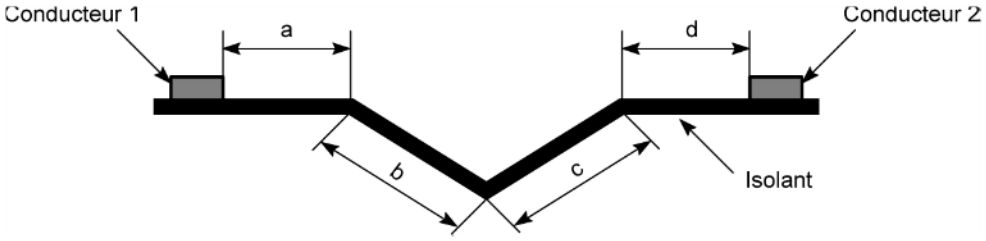


Figure 3.12 – Illustration de la ligne de fuite.

3.4.8 Le degré de protection

■ **Principe de lecture**

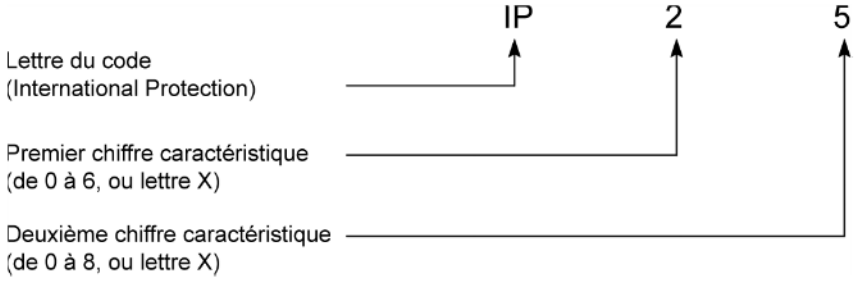


Figure 3.13 – Le degré de protection.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 3.2 – Décodage du degré de protection.

Élément chiffre IP	Signification pour le matériel	Signification pour la protection des personnes
Premier chiffre caractéristique	Contre la pénétration de corps solides étrangers	Contre l'accès aux parties dangereuses
0	Non protégé	Non protégé
1	De diamètre > 50 mm	Dos de la main
2	De diamètre > 12,5 mm	Doigt
3	De diamètre > 2,5 mm	Outil
4	De diamètre > 1 mm	Fil
5	Protégé contre les poussières	Fil
6	Étanche aux poussières	Fil
Deuxième chiffre caractéristique	Contre la pénétration de l'eau avec effets nuisibles	
0	Non protégé	
1	Gouttes d'eau verticales	
2	Gouttes d'eau (15° d'inclinaison)	
3	Pluie	
4	Projection d'eau	
5	Projection à la lance	
6	Projection puissante à la lance	
7	Immersion temporaire	
8	Immersion prolongée	

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ IP2X

L'exécution d'interventions techniques dans des locaux électriques dangereux et réservés à des personnels habilités tels que : armoires électriques, coffrets électriques basse tension, transformateur basse tension, tableau de distribution électrique, etc. implique, conformément aux prescriptions UTE C 18-510 et en complément des dispositions réglementaires : gants isolants, protège tête (casque), lunettes de protection, etc.

Et l'utilisation d'accessoires « en contact direct » d'un degré de protection IP2X. l'EDF impose cette disposition.

3.4.9 Les marquages

■ Le marquage CE et la marque nationale

C'est l'identification des produits conformes à la DBT+CEM en vigueur pour les appareils de mesurage et leurs accessoires de raccordement.
Le marquage apposé par le fabricant implique :

– la visibilité du marquage sur l'appareil, le conditionnement et sur les documents ;
– l'autocontrôle ou la vérification par un organisme notifié.

Le marquage CE est la responsabilité du fabricant ou de son représentant.
Le marquage CE n'est pas un label de qualité.
Le marquage CE impose une **marque nationale** délivrée par un organisme notifié :

– LCIE marque NF en France ;
– VDE marque VDE en Allemagne ;
– KEMA aux Pays-Bas ;
– UL aux États-Unis ;
– CSA au Canada.

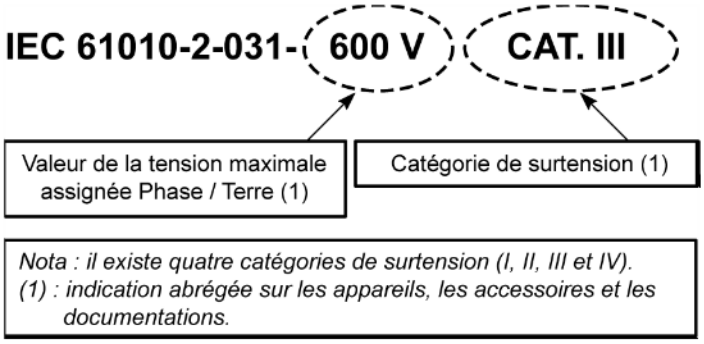


Figure 3.14 – Illustration de la norme internationale.

■ Le marquage de sécurité

La norme CEI 61010-1 préconise l'indication par un marquage sur l'appareil à ne pas confondre avec le marquage CE :

– de la tension assignée phase/terre (en face avant et près des bornes d'entrée) ;
– de la catégorie d'installation ;
– du degré de pollution ;
– du symbole attention « ! » qui signifie : « voir document d'accompagnement » ;
– du logo ou nom du constructeur ;
– du type de produit ;
– des indications du ou des fusibles.

À l'arrière de l'appareil : du symbole double isolement (si c'est le cas), de la nature de l'alimentation, du ou des types de fusibles, de la CEI 61010 et du marquage CE.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Ce sont les informations de sécurité qui doivent figurer impérativement sur le produit et dans la documentation technique.

☐ Sur le produit

Près des douilles d'entrée :

- Tension de mode commun, assignée phase/terre.
- Catégorie de surtension : Cat. I, II, III ou IV.
- Courant maximum d'utilisation.
- Renvoi à la documentation technique (Mode d'emploi) qui doit être jointe au produit et rédigée dans la langue du pays utilisateur.

☐ Que faire lorsqu'un appareil n'est pas adapté à la norme ?

Il est possible d'utiliser des appareils de catégories inférieures à celles exigées à la condition d'y adjoindre une « interface » satisfaisant à la norme.

Quelques exemples d'applications illustrés

Exemples pour passer de catégorie I ou II en catégorie III :

Pince ampèremétrique et oscilloscope : une pince ampèremétrique de catégorie III insérée entre l'entrée de l'appareil et le montage à mesurer (*figure 3.15*).

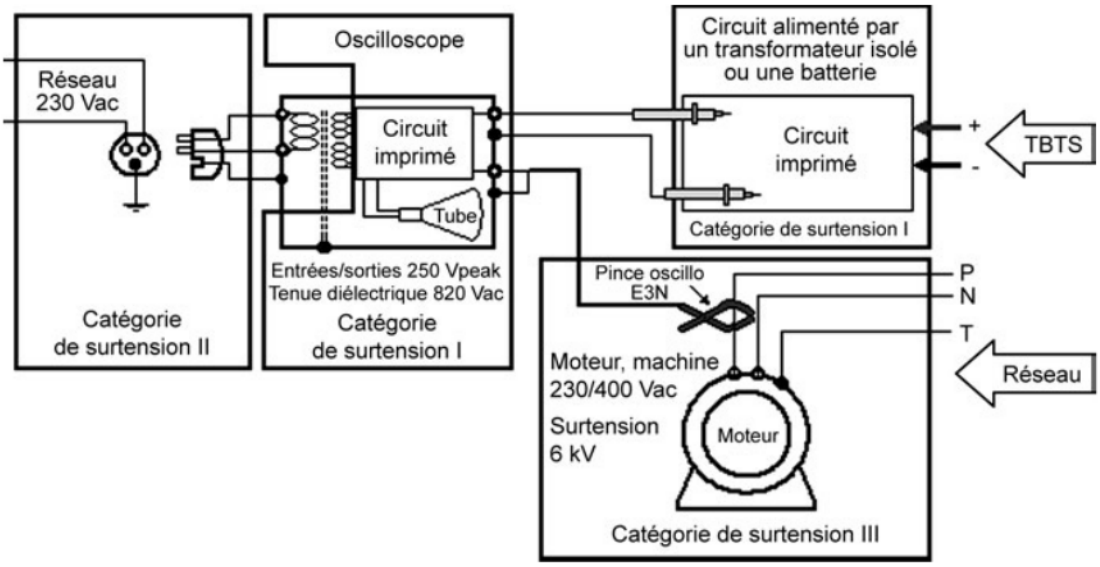


Figure 3.15 – Illustration du raccordement d'un oscilloscope sur le réseau via une pince ampèremétrique.

Oscilloscope et sonde différentielle : par une sonde différentielle de catégorie III insérée entre l'entrée de l'appareil et le montage à mesurer dans le cas d'un oscilloscope, il est aussi possible d'utiliser directement un appareil à entrées différentielles résidentes (*figure 3.16*) ou un oscilloscope à entrées différentielles (*figure 3.17*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

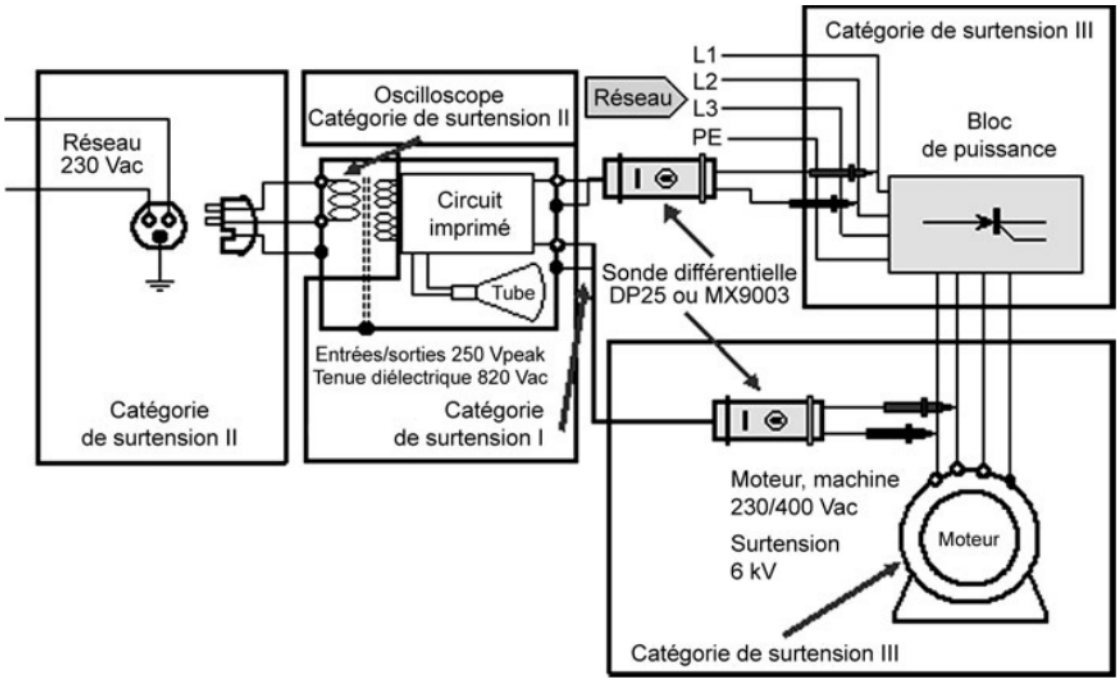


Figure 3.16 – Illustration du raccordement d'un oscilloscope sur le réseau via une sonde différentielle.

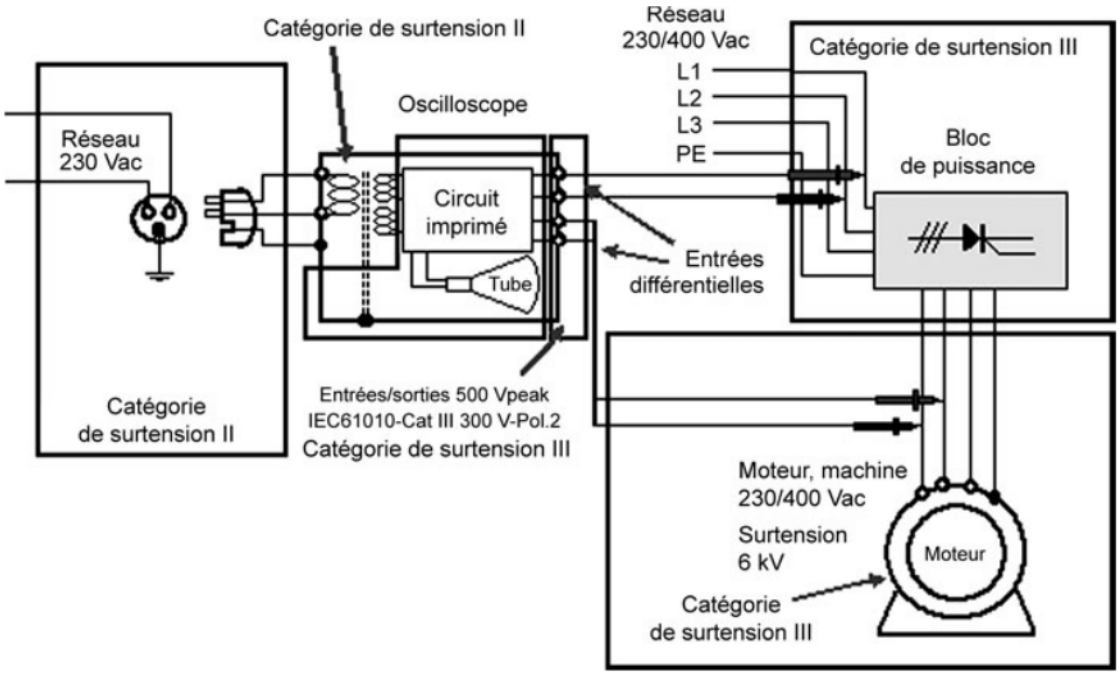


Figure 3.17 – Illustration du raccordement d'un oscilloscope à entrées différentielles sur le réseau.

☐ **Accessoires de test et de raccordement de sécurité : CEI 61010-2-031 & CEI 61010-2-032**

Accessoires IP2X de nouvelle génération : pointe de touche rétractable.
Avantages :

– sécurité de l'utilisateur : 600 V cat. IV ou 1000 V cat. III évite tout contact direct grâce à sa gâchette ;

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– rangement plus pratique ;
– protection mécanique des pointes de touche ;
– extraction du fusible HPC en toute sécurité grâce à un système baïonnette et un témoin lumineux de fusible défectueux ;
– fusible HPC encapsulé avec détrompeur mécanique afin d'éviter tout risque d'erreur d'interchangeabilité.

Figure 3.18 – Sondes d'oscilloscopes : 2 rapports 1/1 ou 1/10, bande passante 100 MHz, tension maxi 600 V, impédance de 1 MΩ/40 pF et 10 MΩ/10 pF.

☐ Les sondes différentielles de tension

Se reporter au chapitre 4 pour avoir la justification de l'emploi d'une telle interface d'appareils de mesures.

☐ Le détecteur de tension : DDT/VAT

Se reporter au chapitre 4 pour avoir la justification de l'emploi d'une telle interface d'appareils de mesures.

L'exécution de travaux « hors tension », sur machines, armoires ou moteurs, implique le respect des conditions suivantes :

– nécessité d'arrêter l'alimentation des matériels et des équipements desservis par l'installation ou la partie d'installation concernée ;
– séparation de l'installation ou de la partie d'installation concernée de toute source d'énergie (réseau de distribution, groupes électrogènes, batteries d'accumulateurs…) ;
– condamnation en position d'ouverture de tous dispositifs de coupure assurant la séparation des sources d'énergie ;
– **détection de l'absence de tension par un dispositif normalisé sûr et fiable** :
  • Mise en court-circuit et à la terre des ouvrages.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

- *Nota :* la nouvelle norme européenne EN 50110, sur « l'exploitation des installations électriques », se réfère aux décrets.
- Les normes **NFC 18-310** (Ed. 85) et **CEI 61243-3** (Ed. 98) s'appliquent à la vérification d'absence de tension qui doit être effectuée à l'aide d'un appareil normalisé prévu à cet effet (par exemple CDA 101 VAT, DDT C.A 700, C.A 701 & C.A 711), à l'exclusion de tout autre multimètre ou testeur.
- Du 14 novembre 1988 et du 16 février 1982 ainsi qu'à la publication UTE C 18-510.

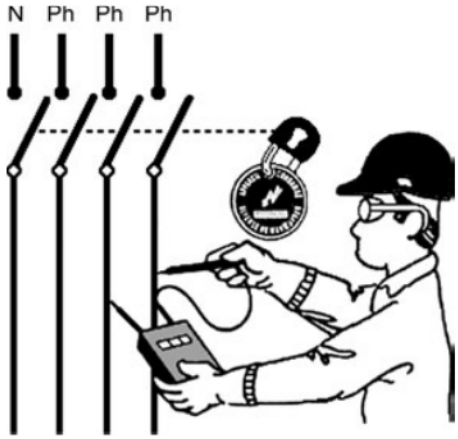


Figure 3.19 – Illustration d'une vérification de présence de tension avec un DDT.

☐ Que faire des anciens produits existants ?

Tout d'abord, vérifier leurs conformités aux anciennes normes de sécurité en vigueur (CEI 348, CEI 414) ; dans le cas contraire, il est conseillé la plus grande prudence et notamment d'envisager la réforme.

Le mieux qui puisse être envisagé pour réhabiliter ce qui peut l'être est la « mise en sécurité », mais la mise en conformité n'est pratiquement jamais possible pour les raisons suivantes : non respect des lignes de fuite ou/et des distances dans l'air entre pistes sur le circuit imprimé au niveau des commutateurs, mauvais indice de résistance au cheminement des matériaux (IRC), absence de parasurtenseurs aux entrées de l'appareil…

Possibilités d'accès manuel sans l'aide d'un outil aux éléments internes véhiculent des tensions dangereuses (par les trappes à piles, par la possibilité d'un démontage manuel des capots de protection, etc.).

Les solutions

S'assurer que les appareils sont conformes aux nomes en vigueur juste avant le 1er janvier 1997 (CEI 348 ou CEI 1010, CEI 414).

Aucune partie conductrice véhiculant des tensions dangereuses ne doit pas être accessible à l'utilisateur sans l'aide d'un outil. Mettre des bornes de sécurité « doubles puits » et des cordons de sécurité, bloquer les trappes à piles, les capots, les boîtiers.

S'assurer que les appareils sont équipés de fusibles HPC (haut pouvoir de coupure).

Mettre si nécessaire, et notamment en catégorie III, des parasurtenseurs au niveau des entrées pour limiter des surtensions transitoires.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Passer chaque fois que cela est possible, les anciens appareils de catégorie III dans des salles de mesures/physiques de catégories II, ce qui limite les risques.
Rénover les salles d'électrotechnique avec des équipements aux normes (appareils et cordons de sécurité) et de catégorie III avec un minimum de 300 Vac assigné phase/terre (ces ateliers étant en général limités à une alimentation de réseau triphasé 400 V).
Exécuter des travaux hors tension selon UTE C 18-510.
Utiliser le détecteur de tension (DDT/VAT).
Exécuter des travaux « hors tensions », sur machines, armoires, ou moteurs, implique le respect des conditions suivantes :

– nécessité de couper l'alimentation des matériels et des équipements desservis par l'installation concernée ;
– séparation de l'installation ou de la partie de l'installation concernée de toute source d'énergie (réseau de distribution, groupes électrogènes, batteries d'accumulateurs…) ;
– condamnation en position d'ouverture de tous les dispositifs de coupure assurant la séparation des sources d'énergies ;
– vérification de l'absence de tension par un dispositif normalisé sûr et fiable ;
– mise en court-circuit et à la terre des ouvrages.

La directive CEI 61243-3, qui fait référence à la NFC 18-310, implique que la vérification d'absence de tension soit effectuée à l'aide d'un appareil normalisé prévu à cet effet à l'exclusion de tout autre multimètre ou testeur.

Évolution des normes internationales

La nouvelle norme européenne EN 50110, sur « l'exploitation des installations électriques » se réfère aux décrets du 14 novembre 1988 et du 16 février 1982 ainsi qu'à la directive UTE C 18-510.
Le comité de normalisation a supprimé la NFC 18-310, c'est la EN 61243-3 qui fait maintenant référence en attendant les décrets d'applications en cours de rédaction.
Le VAT (vérificateur d'absence de tension) change de caractéristiques et de nom. Il convient maintenant de le nommer DDT (détecteur de tension).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

B

Pratique de la mesure

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

4 • MESURE DE TENSION

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Au sein de ce chapitre va figurer l'ensemble des instruments de mesure capables de détecter, de quantifier et de visualiser la grandeur électrique tension sans les multimètres qui feront l'objet d'un chapitre à part entière.

4.1 Détection de tension après consignation d'une installation

4.1.1 Pourquoi réaliser une détection de tension appelée autrefois une vérification d'absence de tension ?

Le simple bon sens impose de considérer comme étant « sous tension » tout ouvrage électrique pour lequel on ne dispose pas d'une attestation de consignation. Cette situation impose l'obligation d'avoir recours à cette vérification avant toute intervention.

Mais, comme nous l'avons vu précédemment, la norme UTE 18-510 prescrit l'utilisation d'un DDT (détecteur de tension anciennement nommé VAT) lors de chaque consignation d'installation. Cet appareil spécifique s'intègre dans la liste des équipements de protection individuelle (EPI) que tout intervenant doit posséder.

Rappelons que le chargé de consignation ayant le titre d'habilitation HC ou BC doit exécuter ces tâches :

– Il exécute ou fait exécuter les manœuvres de consignation.
– Il est responsable de la séparation de l'ouvrage avec ses sources de liaison et de la condamnation des organes de séparation.
– Il établit l'attestation de consignation.

Rappelons aussi que la DDT ou VAT est intégrée aux différentes manœuvres de consignation :

– la **séparation** après avoir identifié la ligne sur laquelle il y a intervention : elle doit être visible et pleinement apparente ;
– la **condamnation** : par un cadenas ou une serrure associée à une pancarte d'identification et d'information ;
– l'**identification** : visuelle si l'on peut suivre la ligne ;
– la **vérification d'absence de tension** et mise à la terre et en court-circuit : dans tous les cas aussi près que possible du lieu de travail (non obligatoire en BTA).

4.1.2 Remarques importantes

Pourquoi ne pas utiliser un voltmètre pour détecter la tension ?
Les appareils de mesurage ne doivent pas être utilisés à cet usage, pas plus que les détecteurs d'absence de tension ne peuvent être considérés comme des appareils de mesurage.
On ne devra jamais utiliser un voltmètre ou multimètre, mais un testeur spécialisé nommé DDT pour des questions de sécurité, d'autocontrôles obligatoires et entre autre, d'impédance d'entrée :

$$Ze = Ue/Ie$$

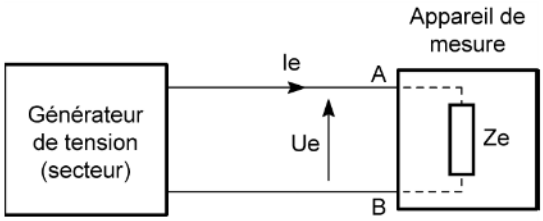


Figure 4.1 – Schéma de modélisation d'un générateur auquel on connecte un appareil de mesure pour détecter la présence de tension.

Vu des points A et B (*figure 4.1*) l'impédance d'entrée est équivalente à *Ze*. Nous allons à présent démontrer pourquoi.
Comparatif :
Vérification d'une absence de tension sur une ligne bifilaire de 100 m de longueur avec un DDT (impédance d'entrée de l'ordre de 75 kΩ).
Si un courant parasite de 1 µA apparaît, la tension correspondante est de l'ordre de :

$$U = Ze \cdot I = 75 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} = 75 \text{ mV} \cong 0 \text{ V}$$

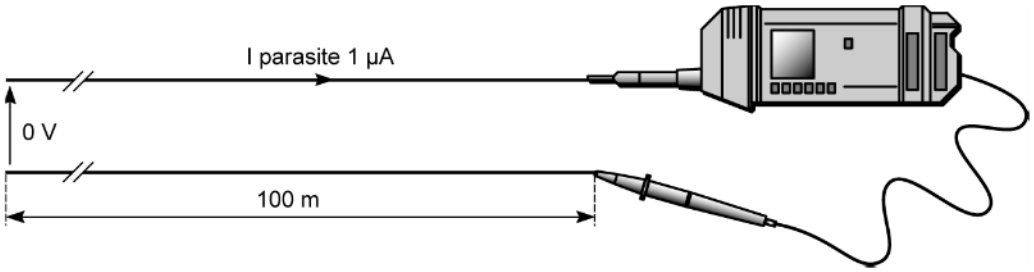


Figure 4.2 – Représentation d'un DDT connecté à la source, ici le C.A 704.

Vérification d'une absence de tension sur une ligne bifilaire de 100 m de longueur avec un multimètre numérique (impédance d'entrée de l'ordre de 10 MΩ).
Si un courant parasite de 1 µA apparaît, la tension correspondante est de l'ordre de :

$$U = Ze \cdot I = 10 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-6} = 10 \text{ V} \neq 0 \text{ V}$$

La valeur de la tension ne devient plus négligeable !

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

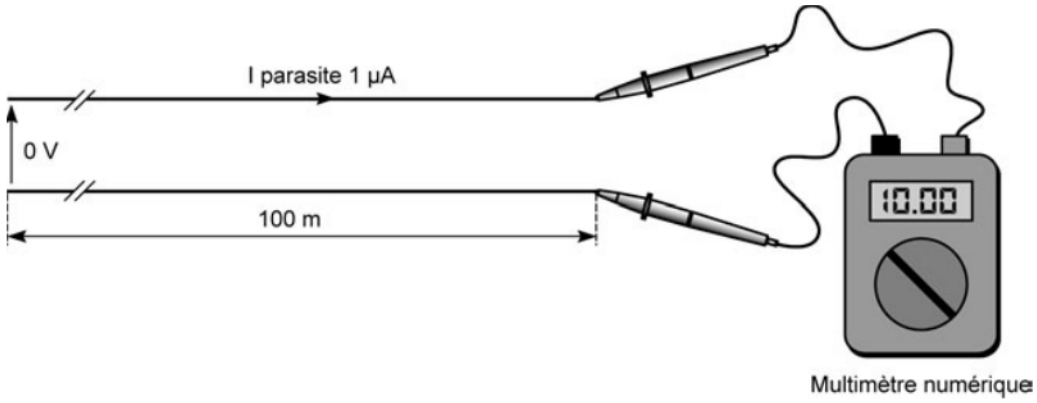


Figure 4.3 – Représentation d'un multimètre connecté à la source.

Conclusion : le détecteur de tension avec sa faible impédance d'entrée, sera insensible aux courants parasites et garantira la sécurité de tous.

a) Identifier le lieu de contrôle de la présence tension (par exemple sous le disjoncteur consigné).

b) Immédiatement avant chaque opération effectuée avec ce matériel et immédiatement après, il est indispensable de vérifier son bon état de fonctionnement. Tout détecteur de tension réglementaire dispose obligatoirement des éléments pour le contrôler.

c) Lors de l'utilisation de ces appareils en BT, l'emploi de gants isolants est **obligatoire** lorsque l'opérateur opère à proximité de pièces nues présentant des risques notables de contact direct en cas de faux mouvement.

d) Ils peuvent être du type lumineux ou du type sonore, mais dans tous les cas ils doivent être adaptés à la tension des installations sur lesquelles ils sont utilisés.

4.1.3 Comment mettre en service un DDT ? Méthodologie de mise en œuvre

1) Il est obligatoire de tester son fonctionnement avant et après chaque opération de consignation.

Avant toute utilisation, il faut s'assurer de son bon fonctionnement en court-circuitant les pointes test tout en appuyant sur le bouton test d'alimentation, un signal sonore et lumineux indique son bon état. L'image ci-après illustre le test préliminaire à effectuer avant chaque utilisation et chaque rangement de l'appareil.

Rappel : les équipements de protection individuelle (gants, casque, écran facial et blouse à manches longues) sont obligatoires au voisinage des pièces nues sous tension. Toute bague, gourmette ou autres bijoux sont à prohiber.

2) Pour valider si l'absence de tension est réelle, il suffit de placer les pointes tests entre phase et neutre et entre phases en aval de l'appareil ayant séparé la source de tension du reste du montage pour que l'appareil affiche la valeur de la tension. Si jamais la séparation n'était pas correcte, la présence de tension serait signalée par un avertisseur sonore et des diodes électroluminescentes signaleraient le niveau de tension.

3) Après l'avoir utilisé et avant de le ranger, il faut vérifier à nouveau par le même procédé évoqué précédemment, son état de fonctionnement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Autotest de bon fonctionnement

Conforme à la NF EN 61243-3, dans le respect de la réglementation UTE 18-510, le DDT/VAT C.A 760 comporte un "Autotest".

Mise en oeuvre :
- Amenez la pointe de touche Rouge en contact avec la pointe de touche Noire.
- Appuyez sur le poussoir "Autotest".
- Toutes les LEDs de tension doivent s'allumer et le Buzzer fonctionner.

Figure 4.4 – Représentation du test de fonctionnement d'un DDT.

4.1.4 Applications possibles du DDT

Il est possible aussi de tester la polarité sur des appareils fonctionnant en continu. Le choix d'un DDT (VAT) repose essentiellement sur la tension BT maximale supportée et quelques fonctionnalités diverses.

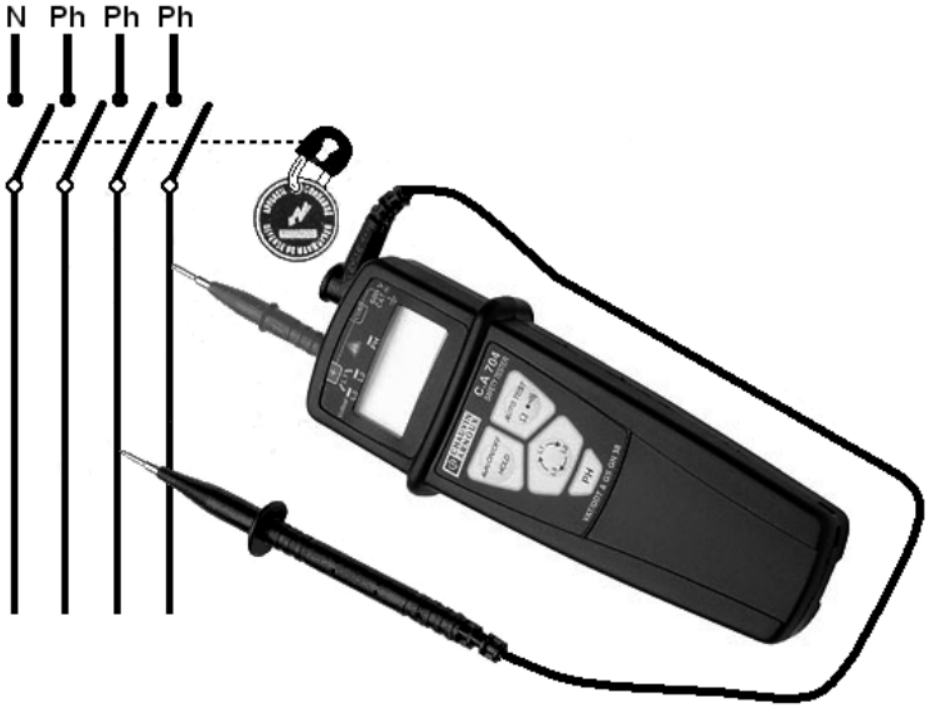


Figure 4.5 – Détection de tension (DDT) dans les établissements tertiaires ou commerciaux connectés au réseau EDF afin de valider toute consignation d'installation.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 4.6 – Vérification rapide des prises secteur 2P+T en tension, position de la phase et du neutre ainsi que du raccordement de la terre (DDT C.A 704).

Figure 4.7 – Repérage de phase sur bornier dans une armoire (C.A 760).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 4.8 – Contrôle de la présence de tension dans les tableaux électriques et armoires électromécaniques grâce aux pointes de touches (C.A 760).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

4.1.5 Choix d'un DDT (ou VAT)

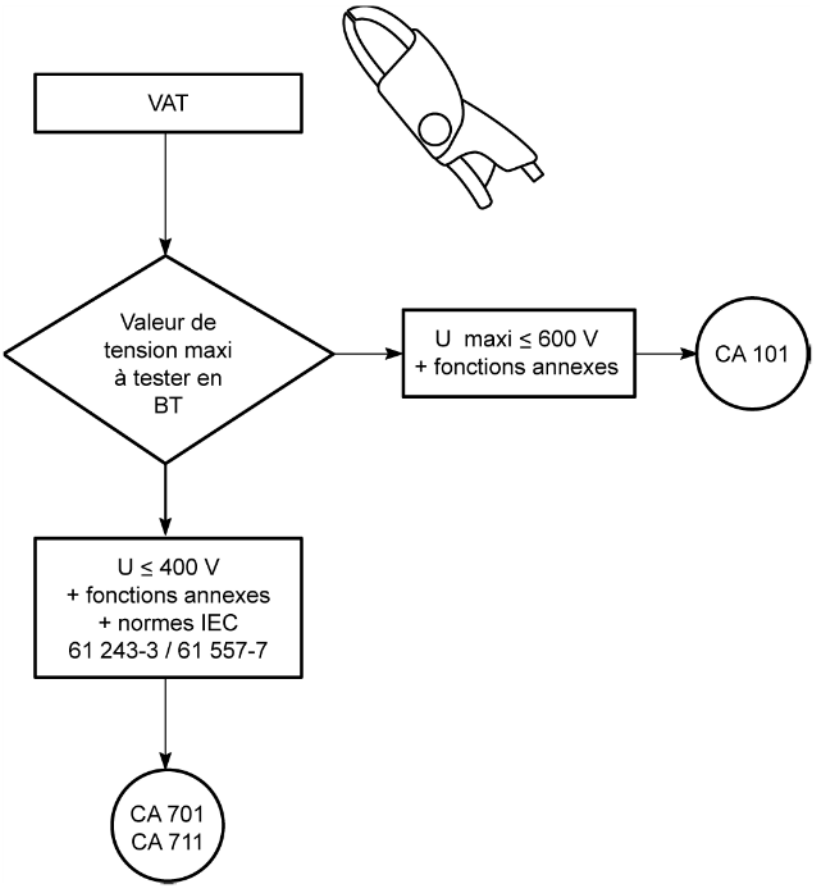


Figure 4.9 – Organigramme de choix d'un DDT.

4.1.6 Les normes

Les détecteurs d'absence de tension et détecteurs unipolaires doivent répondre aux prescriptions des normes en vigueur (NFC 18-310 et NFC 18-311).
Mais ils doivent surtout être conformes à la norme **CEI 61243-3** (norme mondiale sur les détecteurs de tensions bipolaires ne dépassant pas les 1000 V) ainsi qu'à la norme UTE C18-510 (norme française sur l'exécution de travaux dangereux réservés aux personnels habilités qui prévoit en complément des dispositions réglementaires l'utilisation d'accessoires d'un degré de protection IP2X – voir rappel sur les normes) et à la NFC 18-310 (implique que la détection de l'absence de tension s'effectue uniquement avec un DDT et rien d'autre).
Les détecteurs de tension ayant supplanté les vérificateurs de tension, ne se limitent plus à la simple détection de tension, les constructeurs ont prévu de leur adjoindre d'autres fonctions qui les placent au plus près des appareils communément appelés les « testeurs ».

4.2 Testeurs et multitesteurs

4.2.1 Les testeurs

Ces testeurs sont adaptés pour la maintenance et la rénovation électrique d'un bâtiment car ils permettent de connaître la présence d'un potentiel dangereux sur une installation parfois vétuste plus que de faire une mesure précise de ce potentiel.
Certains bipolaires permettent de contrôler les installations soumises à un potentiel maximum de 690 Veff.
Certaines fonctionnalités permettent :

– un repérage du conducteur de phase afin de vérifier si le câblage est conforme au schéma. Ce test s'effectue à l'aide d'une seule pointe de touche permettant ainsi un contrôle très rapide. Un bip sonore accompagne toujours la Led correspondante au niveau de tension ;
– un test de continuité sonore ainsi qu'une mesure de résistance jusqu'à 300 kΩ.

Sur certain testeur un écartement de 19 mm est prévu entre les pointes de touche pour améliorer la rapidité de mesure des prises de courant, le test ne s'effectuant que d'une main. De plus, il permet aussi une meilleure pénétration des éclips de sécurité des prises 2P+T.

■ Applications possibles

– Détection d'un potentiel dans une boîte de dérivation, une prise : un entraxe de 19 mm assure le test rapide des prises, d'un départ d'un tableau ou sur un disjoncteur.
– Test de bornier (vérification de la connectique).
– Repérage du conducteur de phase dans une armoire électrique à l'aide d'une seule main.
– Test de fusible.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

■ Remarque importante

Dans le cadre de la maintenance dans le bâtiment, le test de tension phase/terre est fréquent, il faut donc prendre en compte le fait que l'impédance du testeur doit être assez grande pour ne pas faire déclencher les disjoncteurs différentiels de 30 mA de l'installation.
En effet un testeur ayant une impédance *Ze* de l'ordre du kilo-ohm implique un courant $Ie = 230/1 \times 10^3 = 230$ mA cela aura pour conséquence de faire déclencher le disjoncteur différentiel de haute sensibilité de 30 mA (schéma de liaison à la terre TT).
Il faut donc une impédance d'entrée suffisamment grande de l'ordre 400 kΩ, dans ce cas $Ie = 230/400 \times 10^3 = 0{,}57$ mA < 30 mA aucun déclenchement intempestif.
On pourra donc utiliser sans problème ce type de testeur sur des installations protégées par un disjoncteur différentiel haute sensibilité.

■ Normes

Ces testeurs répondent aux normes précédemment citées et de plus ils sont conformément à la norme CEI 61010-1 catégorie III pollution 2, VDE 680-5 (pour l'Allemagne) dotés d'une garde antiglissement sur toute la périphérie du boîtier ainsi que sur le cordon de test.

4.2.2 Les multitesteurs

■ Applications possibles des multitesteurs

– Mesures précises des niveaux de tension dans une armoire : test de tensions des prises, de fusible.
– Test de tensions dans une armoire, un coffret.

Figure 4.10 – Dépannage dans un TGBT avec identification de la phase et du neutre sans faire disjoncter les différentiels (consommation 1,4 mA).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Diagnostic niveau 1 pour la maintenance d'appareils type : photocopieur, petit électroménager, ainsi que tous les tests déjà cités à propos des testeurs.

Figure 4.11 – Vérification de tension sur un bornier.

Figure 4.12 – Branchement direct pour un contrôle systématique des prises de courant 2P+T avec éclairage de l'afficheur en cas d'obscurité.

Figure 4.13 – Contrôle d'un fusible avec test sonore de continuité.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Figure 4.14 – Repérage de la phase avec une seule pointe de touche dans un TGBT, signal sonore discontinu et Led « Ph » clignotante.

Figure 4.15 – Test sonore de continuité par action sur le bouton poussoir au dos du boîtier.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Méthodologie illustrée

Utilisé en dérivation, en plus des mesures du testeur, le mutitesteur va afficher la mesure exacte de tension, et de résistance, test de continuité phase-terre en cas de court-circuit sur un câble ainsi que la polarité des batteries et accumulateurs, une fonction volt-test s'allumera pour indiquer la présence tension.

Remarque importante

Certains des testeurs permettent de faire un diagnostic de premier niveau en s'assurant de la présence tension entre la phase et la terre sans **faire disjoncter le différentiel haute sensibilité de 30 mA par une impédance d'entrée suffisamment grande** (400 kΩ). Ce point est suffisamment important à signaler dans des interventions de types tableautiers, artisans électriciens, ou industriels.

Choix des multitesteurs

Comme précédemment, le choix repose sur le niveau de tension BT maximal à mesurer, et ensuite intervient la sélection de certaines fonctionnalités recherchées comme la mesure de résistance, un entraxe des fiches de 19 mm correspondant à celui d'une prise Phase/Neutre, test sonore de continuité ou de fusibles, mesure de tensions continues, etc.

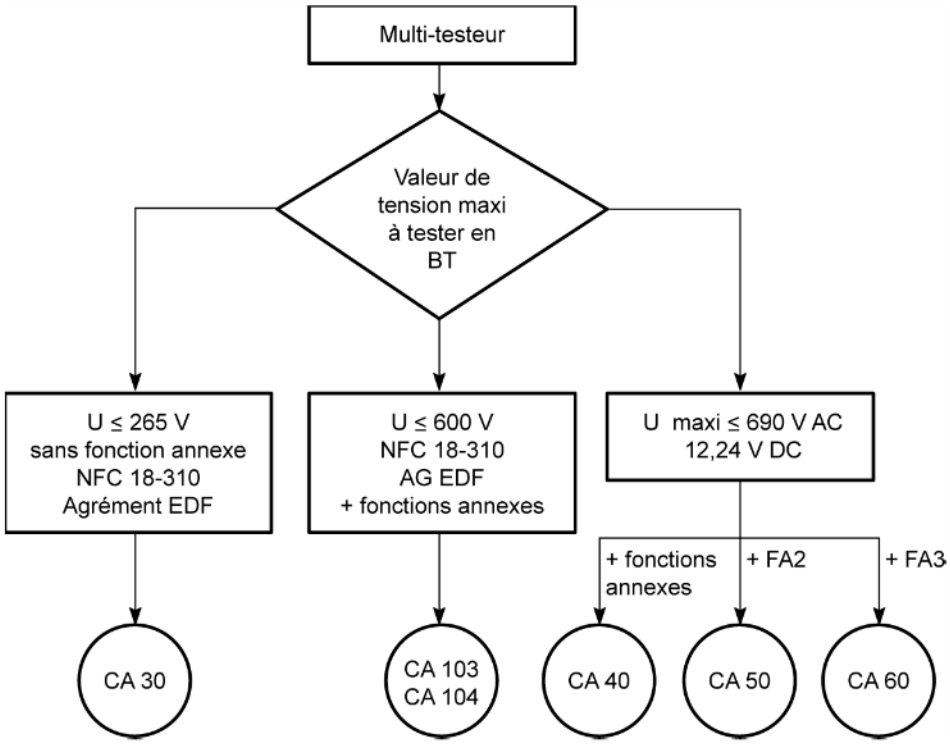


Figure 4.16 – Organigramme de choix d'un multitesteur.

Les normes en vigueur

Ces multitesteurs répondent aux normes précédemment citées. De plus ils sont adaptés à la norme CEI 61010-1 catégorie III-2.

Conseils : ce type d'appareil convient bien aux artisans, aux personnels de maintenance travaillant sur des installations de distribution électrique basse tension, car son ergonomie adaptée lui donne un confort d'utilisation ainsi que des fonctions suffisantes pour un **diagnostic de 1er niveau**.

4.2.3 Les détecteurs de tension

Nous avons vu précédemment que les détecteurs de tensions (DDT) avaient remplacé les VAT en offrant des fonctionnalités supplémentaires. Nous verrons ici seulement les détecteurs de tension non homologués en détecteur de tension prévus pour la consignation.

Applications possibles

– Détection de tension dans un coffret HPC basse tension.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus au termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Repérage de phase dans un coffret HPC basse tension.
– Détection de tension dans un coffret d'éclairage public (EP).
– Test de rotation des phases dans un tableau basse tension.
– Test de fusible.

Remarque : points forts pour certains modèles

– Test de l'autonomie de la pile (touche autotest).
– Étanchéité (IP65).
– Système redondant actif si les piles sont déchargées.
– Une ergonomie adaptée à toutes les applications.
– Pointes de touches nouvelle génération IP2X avec gâchette.
– Conformité à la norme CEI 61243-3 et agréé EDF.

Méthodologie

Les perchettes ou antennes de contact permettent de se positionner précisément dans une armoire tout en gardant les mains gantées au dehors (*figure 4.17*).
Une pince crocodile (référence) permet de faire la recherche de phase d'une main.
La finesse des pointes de touches ainsi que l'isolant plastique évite tout risque de court-circuit entre bornes.
Le nouveau système de rotation de phase 2 fils assure en toute sécurité le test rapide de l'ordre des phases.

Figure 4.17 – Perchettes ou antennes de contact.

Les normes des DDT

Identique à tous les testeurs, il est conforme à la norme CEI 61010-1 degré de pollution 2, catégorie d'installation III pour une tension assignée phase/terre de 600 V, et catégorie IV pour une tension assignée de 300 V.
Compatible avec la norme CEM, EN 50081-1 en émission et EN 50082-1 en immunité.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'enveloppe protectrice assure un degré de protection IP 65 et les pointes de touches sont du type IP2X.

4.2.4 Voltmètres fixes ou portatifs

Voir aussi chapitre 13 (§ 13.1 « La multimétrie »).
La mesure de tension peut s'effectuer de plusieurs manières différentes :
1) En raccordant directement **un voltmètre** dans le montage en dérivation, la valeur est lue directement sur l'afficheur en volt. Cet appareil portable ou de tableau permet une lecture sous forme d'un galvanomètre ou d'un afficheur numérique.
Inconvénient : il n'y a pas d'isolation galvanique (masses communes).
Avantage : lecture directe.
Pour les voltmètres numériques, se reporter au § 13.1.
2) En utilisant une **sonde de tension** : l'entrée est isolée et permet de mesurer des tensions élevées.
Un commutateur permet diverses atténuations du signal d'entrée. Le signal de sortie en volt est disponible sous forme d'une tension limitée de faible valeur (< 10 V).
Avantages/inconvénients :

– Idéal pour adapter les oscilloscopes ou systèmes à certaines mesures dangereuses (mesures industrielles de catégorie III, entre phases…). L'entrée est flottante (pas de masse commune).
– Isolement galvanique ou très haute impédance entre entrée et sortie.

Les voltmètres seront détaillés à la fin de ce chapitre dans les multimètres, nous allons nous intéresser à présent à la sonde différentielle de tension.

4.3 Sonde différentielle de tension

4.3.1 Pourquoi utiliser une sonde différentielle de tension ?

■ Pour son isolation galvanique (ou hautement résistif)

Comment mesurer, par exemple à l'aide d'un oscilloscope, une tension de 230 V aux bornes d'un rhéostat ?
La prise BNC de l'oscilloscope se comporte comme un contact pour le + du signal et un contact (bague métallique) pour le – ou la masse. C'est une prise étudiée pour protéger le signal à mesurer contre les parasites environnementaux.
Comme tout appareil électrique possédant des pièces métalliques accessibles, il comporte une fiche d'alimentation avec PE (appareil de classe 2) car la prise BNC est métallique et accessible.
Conséquence de cela : la BNC est reliée à la terre, et si vous connectez votre oscilloscope en direct, il y a création d'un courant de défaut entre la phase du montage à essayer et la terre ; et comme la plupart des installations sont en régime TT, il y a déclenchement du disjoncteur différentiel.
Pour remédier à cela on utilise une sonde différentielle de tension qui va isoler (il n'existe alors aucun lien électrique, il y a donc isolation galvanique) le montage à mesurer de la voie et la masse de l'oscilloscope.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

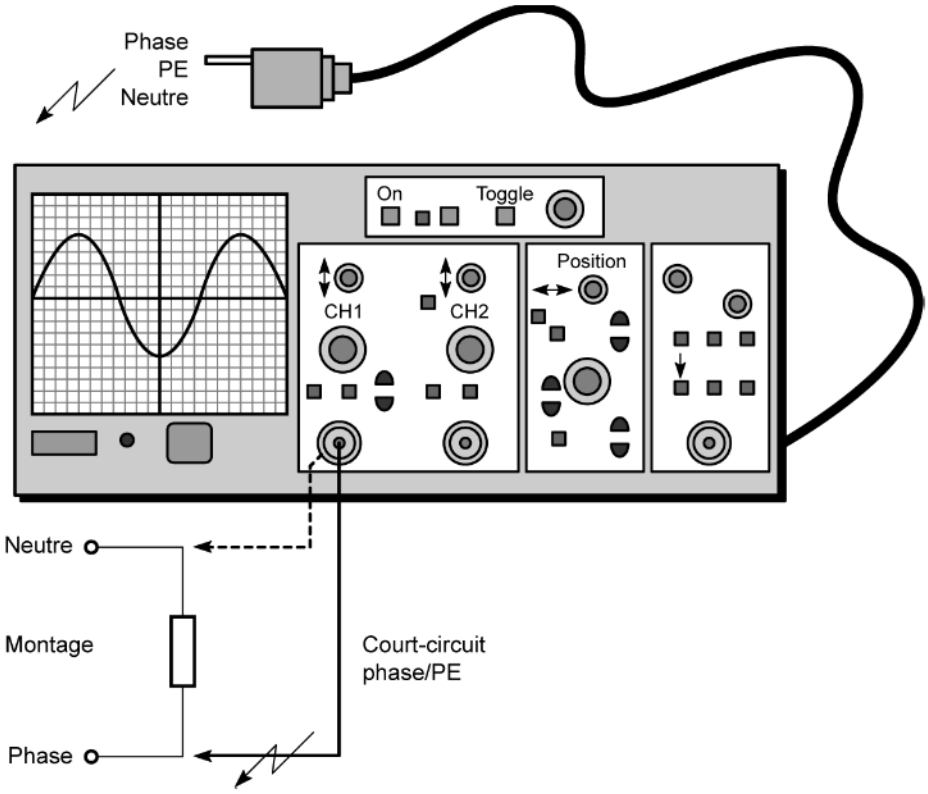


Figure 4.18 – Représentation du défaut d'isolement créé par la masse de l'oscilloscope relié au neutre de l'installation à mesurer.

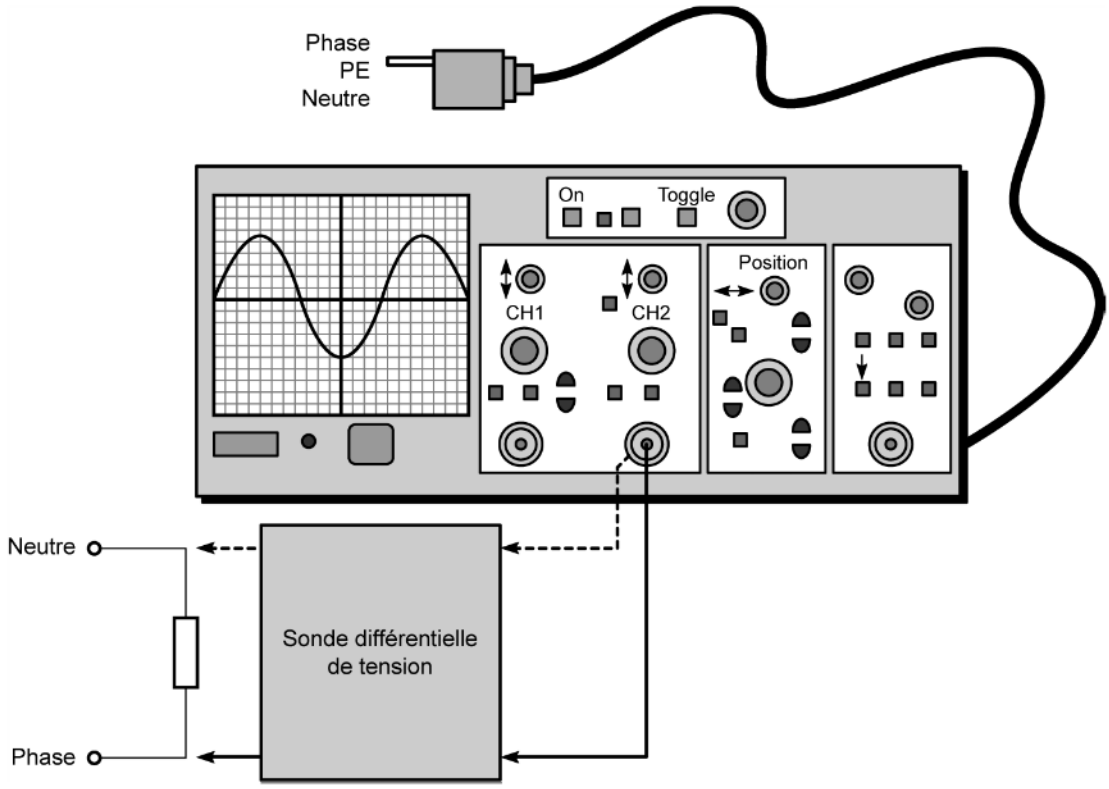


Figure 4.19 – Représentation de l'isolation galvanique apportée par la présence de la sonde différentielle de tension.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ **Pour son atténuation**

En effet, si vous voulez prendre la tension aux bornes d'un moteur asynchrone à cage fonctionnant sous une tension de 400 V, il est impossible, hormis le problème d'isolation qui ne vous permettra pas de réaliser la mesure, vu la valeur de la tension maximale, de visualiser le signal sur un écran d'oscilloscope ne comportant que 4 divisions à partir du zéro sur l'axe des tensions. Il faut atténuer le signal d'un rapport 1/100 ou 1/10 selon les sondes. Ayant 150 V par divisions en réglage fin, il sera possible ensuite d'obtenir la valeur maximale de cette tension à l'écran.

4.3.2 Applications possibles

- Mesure sur paires torsadées des signaux de télécommunications.
- Mesure sur liaison informatique RS232…
- Mesure en domotique sur variateurs électroniques de vitesse de petits moteurs, alimentations à découpages.
- Circuit de commutation rapide à base de transistors, thyristors en électronique de puissance.
- Mesurer le temps de réponse de capteur de température.
- Analyser l'allure d'un signal pour déterminer la présence d'harmoniques avec la fonction FFT (*Fast Fourier Transformation*).
- Courant de court-circuit ou de défaut sur une installation de distribution tertiaire.

4.3.3 Méthodologie de mise en œuvre

Insérer cette sonde entre l'oscilloscope et le montage.

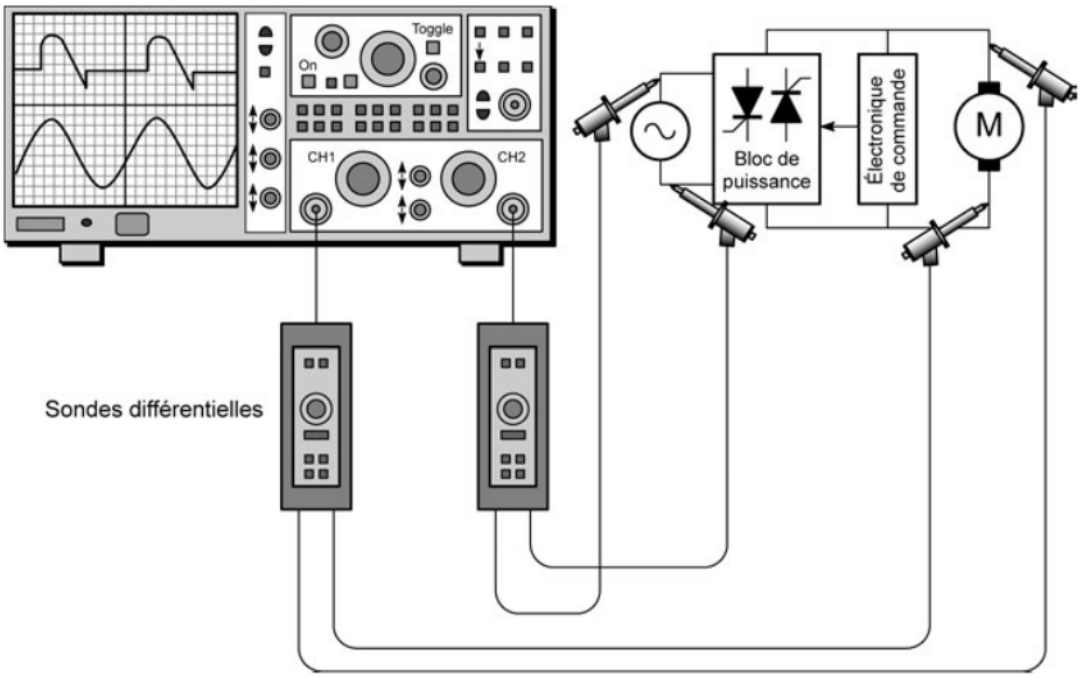


Figure 4.20 – Représentation de la mise en œuvre de deux sondes différentielles de tension.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du code de la Propriété Intellectuelle.

Réaliser la connexion des deux voies sur le montage sans se soucier du point commun entre les deux tensions du fait de l'isolation galvanique des deux voies.

Choisir le calibre de l'atténuation en fonction de la tension à mesurer, calibrer l'oscilloscope en tenant compte de l'atténuation choisie et faire la mesure sur l'oscilloscope.

Sonde double différentielle de tension (*figure 4.21*) : alimentée par le secteur (sans coûts d'exploitation de piles), seule elle permet de couvrir les deux voies de l'oscilloscope dans un seul et même boîtier mais surtout de sécuriser la mesure en alimentant elle-même l'oscilloscope donc pas moyen de réaliser la mesure sans la placer sous tension. Les rapports simples (1/10 et 1/100) peuvent être très facilement pris en compte dans les coefficients d'atténuation des oscilloscopes et permettent donc une lecture directe aisée.

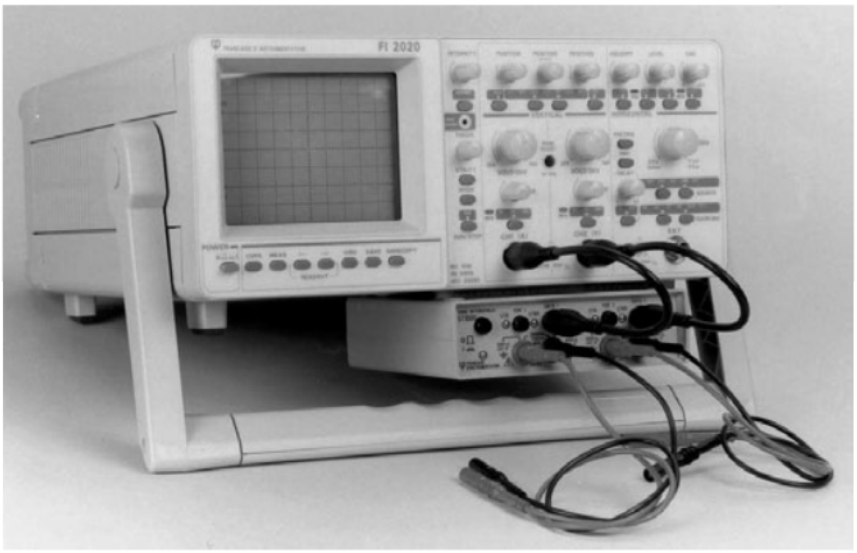


Figure 4.21 – Sonde double différentielle de tension.

4.3.4 Choix d'une sonde différentielle de tension

Le choix d'une sonde différentielle de tension doit s'orienter en fonction du niveau maximal de tension BT à relever (et donc d'en prévoir l'atténuation adaptée), la bande passante en électronique de puissance pour des fréquences élevées (harmoniques) et surtout, ce qui semble être secondaire mais qui devient vite un handicap, c'est le mode d'alimentation de cette sonde (à piles ou sur secteur via une alimentation intégrée).

4.3.5 Les normes

Elle répond à la norme CEI 61010-1-III-2, marquages CE et UL.

Conclusion : après avoir introduit la mesure par sonde différentielle associée à l'oscilloscope, nous allons à présent appréhender la mesure par oscilloscope en présentant les oscilloscopes analogiques, numériques, les mixtes mais surtout les oscilloscopes de terrain qui prennent une part importante des applications actuelles.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

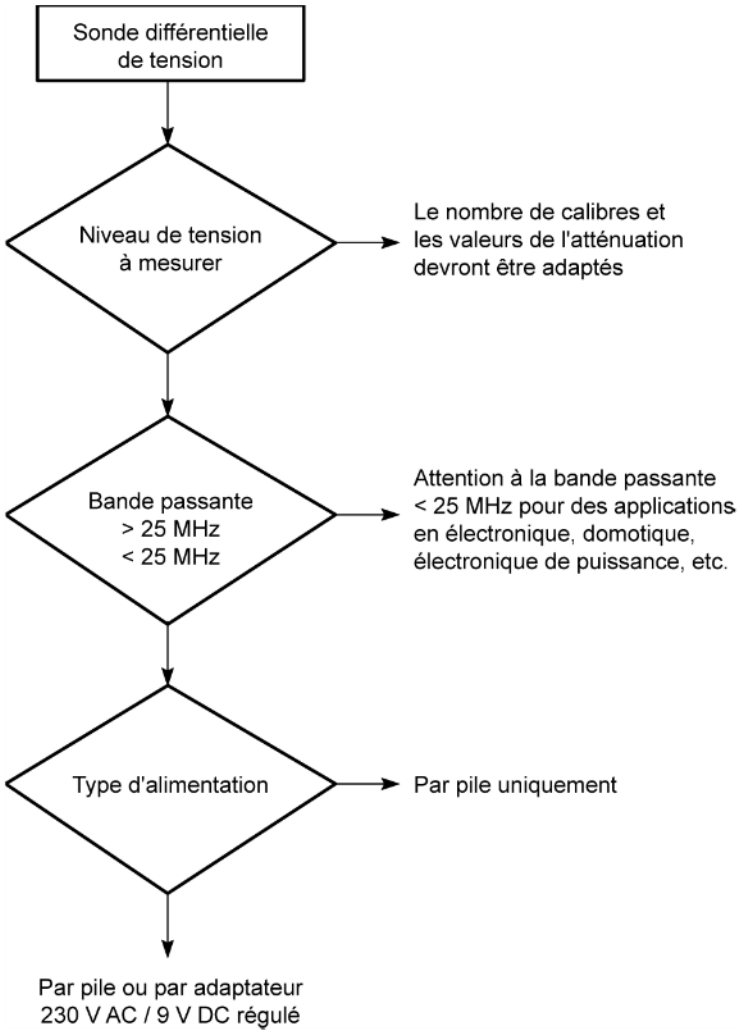


Figure 4.22 – Organigramme de choix d'une sonde différentielle de tension.

4.4 Mesure de tension avec un oscilloscope

4.4.1 Introduction

Les oscilloscopes sont des outils essentiels dans le domaine de l'électrotechnique faisant de plus en plus intervenir l'électronique.

Les ingénieurs et techniciens ont un besoin grandissant d'utiliser ces instruments pour le dépannage, le développement mais aussi pour les tâches de maintenance (corrective ou préventive).

Ce chapitre permet de décrire l'oscilloscope et ses applications à tous les utilisateurs quel qu'en soit leur niveau, en partant de l'oscilloscope analogique de base et en présentant à travers un exemple de mesure un grand nombre de ces commandes et leurs incidences sur les possibilités de mesure de l'appareil.

Ensuite, nous présenterons l'oscilloscope numérique et ses avantages à travers une application, pour réaliser ensuite une comparaison avec l'analogique dans le but d'aider l'utilisateur à faire son choix. Ce qui nous permettra de présenter ensuite les oscilloscopes de terrain (oscilloscopes numériques portatifs) qui deviennent

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

incontournables et de synthétiser l'ensemble par un guide de choix selon les applications souhaitées.

Pour finir nous tracerons les grandes lignes des nouveaux développements en matière d'oscilloscope numérique où le PC est intégré et où la polyvalence de l'instrumentation (oscilloscope de terrain) se fait de plus en plus présente pour que demain notre oscilloscope tende vers une centrale d'acquisition et de traitement à part entière.

L'oscilloscope est un instrument permettant la représentation graphique en deux dimensions de l'évolution d'un ou plusieurs paramètres en fonction du temps (ou d'une autre référence) de presque n'importe quel **phénomène électrique retranscrit en tension**.

Il se démarque du voltmètre par son pouvoir d'**affichage (forme d'onde)** mais aussi par les **valeurs déterminées** sur les relevés (valeur crête, fréquence, FFT…) et ne se contente pas d'afficher uniquement une valeur efficace RMS (AC) ou efficace vraie TRMS (AC+DC) pour les meilleurs ou simplement moyenne (AVG), il réalise le stockage de données et le traitement mathématique pour les numériques.

Puis il permet aussi de visualiser et d'étudier plusieurs signaux à la fois, fonction que ne peut réaliser un voltmètre. Ou il permet aussi, pour des phénomènes lents comme la montée en température, d'être synchronisé par son entrée externe pour obtenir une base de temps permettant ce genre de mesurage.

4.4.2 Oscilloscope analogique

■ Les applications de l'oscilloscope analogique

- Développement et mise au point de matériel électronique : réponse d'un filtre passe-bas.
- Maintenance préventive et corrective (dépannage).
- Électronique de puissance : commutation de semi-conducteur, test d'alimentations à découpage, de hacheur, d'onduleur… énergie dissipée par un semi-conducteur, aide au dimensionnement du dissipateur thermique.
- Électronique de commande : commande de hacheur sur une alimentation, test d'un convertisseur CNA…
- Motorisations : déséquilibre de phase…, relevé de vitesse de rotation via une génératrice tachymétrique… représentation du couple en fonction de la vitesse sur un moteur à courant continu…
- Qualimétrie : relevés harmoniques de la tension d'alimentation (FFT), test en sortie de variateur de vitesse.
- Automatismes, test de capteurs : signaux de sortie d'un codeur incrémental, test de boucle 0-10 V, régulation de température, asservissement de vitesse de moteur à courant continu.
- Enseignement et formation.
- Sécurité et prévention : test de disjoncteur différentiel, de relais thermique…
- Contrôle qualité.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Réglage et mise en œuvre d'un oscilloscope analogique

□ Problématique et mise en situation

Comment visualiser une tension sinusoïdale au secondaire d'un transformateur 230 V/24 V 50 Hz sur une armoire de démarrage moteur industrielle ?

À partir de cet exemple de mesure simple, nous allons passer en revue les principales commandes importantes de l'oscilloscope analogique et expliquer leur réglage afin de mener à bien l'observation et l'exploitation de la tension.

□ Mise en œuvre de l'oscilloscope

Une bonne compréhension des fonctions de l'oscilloscope rend les mesures pleinement exploitables. Afin de se familiariser à l'utilisation de l'oscilloscope, on peut dans un premier temps le décomposer sous forme de blocs fonctionnels représentés *figure 4.23*.

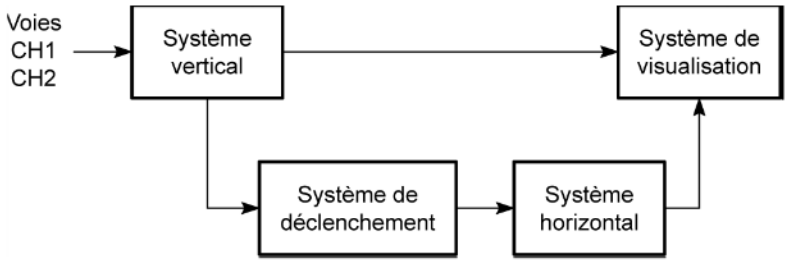


Figure 4.23 – Blocs fonctionnels de l'oscilloscope.

Leurs commandes seront ainsi utilisées lors du réglage de cet appareil dans les différents paragraphes suivants.

Constitution de l'oscilloscope

Un oscilloscope est constitué de différents éléments qui vont permettre la visualisation d'un signal et la mesure de celui-ci :

- tube cathodique ou écran ;
- amplificateur vertical ;
- base de temps ;
- amplificateur horizontal ;
- circuit de déclenchement ;
- alimentation haute et basse tension.

Cette partie de chapitre sera donc articulée en quatre points reprenant chacun les fonctions des schémas blocs ci-dessus : système de visualisation, système vertical, horizontal et système de déclenchement.

Le synoptique suivant permet de discerner les divers éléments matériels constituant les différentes fonctions de l'oscilloscope analogique (*figure 4.24*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

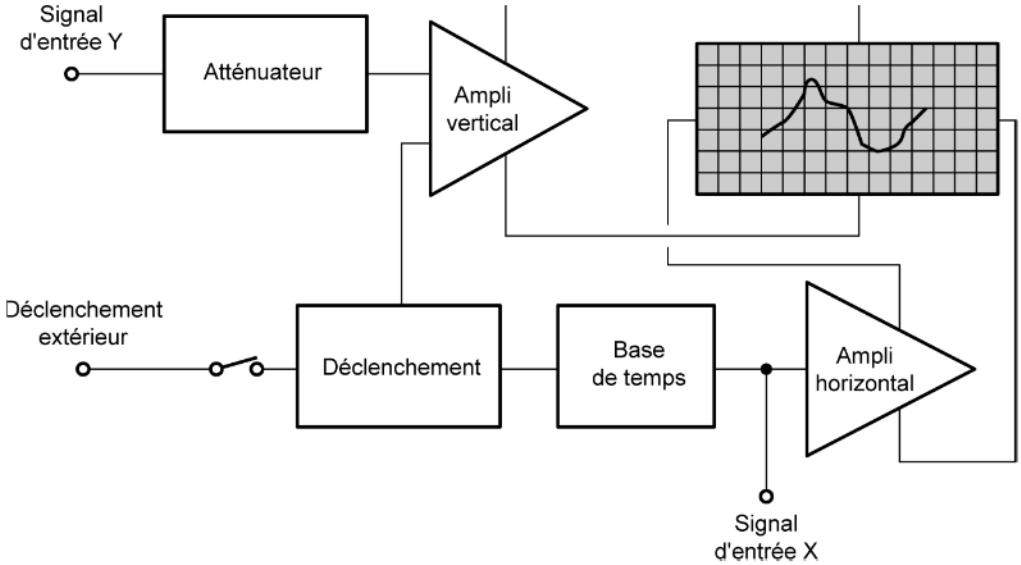


Figure 4.24 – Détail matériel des différents blocs fonctionnels de l'oscilloscope.

Mise en œuvre

Afin de réaliser une mesure de tension au secondaire de notre transformateur nous allons définir le mode opératoire à suivre :

Pour des raisons de sécurité, en classe 1, relier l'oscilloscope à la terre conformément à la norme CEI 61010-1 en connectant simplement le cordon d'alimentation (Ph-N+terre) de l'appareil à une prise 2P+T 230 V 50 Hz.

Veillez à ne pas dépasser la tension de surcharge admissible selon la catégorie de surtension.

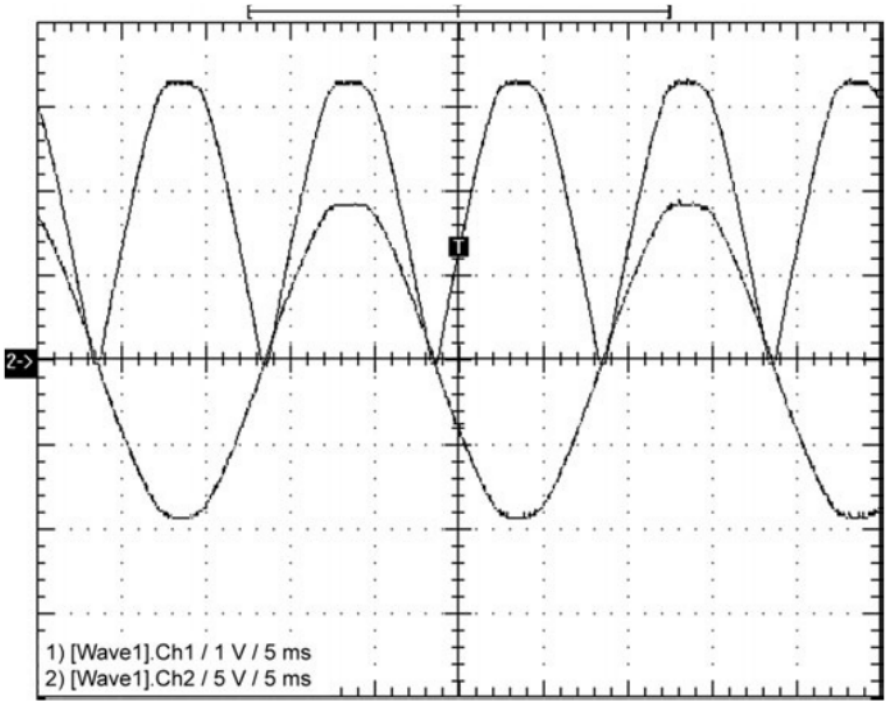


Figure 4.25 – Exemple d'un signal de tension en sortie de transformateur et pont de Graëtz monophasé sur une alimentation 24 V dans une armoire d'automatisme.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Mettre hors tension le transformateur (si possible), sinon utiliser les EPI.
– Connecter l'entrée de la sonde différentielle de tension au secondaire du transformateur.
– Raccorder la sortie de la sonde différentielle à la voie de l'oscilloscope. Calibrer l'atténuation de votre sonde à partir du signal à mesurer.
– Considérer toujours comme déréglé tout oscilloscope que vous utilisez à nouveau.
– Dimensionner vos calibres de tension et base de temps et procéder aux réglages indiqués ci-dessous.
– Mettre sous tension le transformateur et visualiser le relevé de tension pour une exploitation ultérieure.

Réglages à effectuer

A) Commandes du système de visualisation

A.1) Rappel du fonctionnement du système de visualisation à travers celui de l'oscilloscope

Tout oscilloscope est composé d'un système d'affichage fonctionnant avec un tube cathodique : composé d'un canon à électron qui les diffuse vers l'écran.

Ces électrons focalisés forment un faisceau produisant un point au centre de l'écran. La couche fluorescente située sur la face intérieure de l'écran émet une lumière à l'endroit où les électrons frappent celui-ci.

Sur le chemin menant à l'écran, les électrons traversent un système de plaques de déviation. Le point peut se déplacer sur l'écran en fonction des tensions appliquées au système de déviation constituées de plaques horizontales (X) et verticales (Y). C'est ce que l'on appelle la déviation électrostatique.

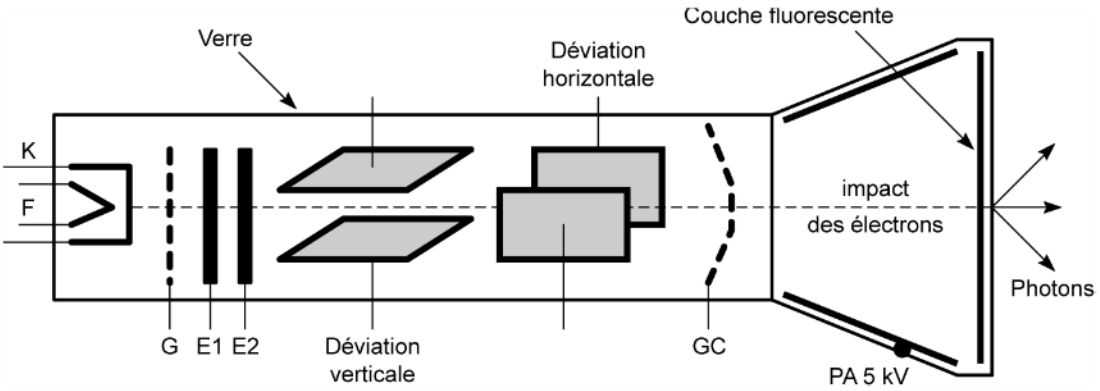


Figure 4.26 – Coupe du tube de visualisation de l'oscilloscope.

Sur la face intérieure de l'écran, des lignes horizontales et verticales sont dessinées ou gravées pour former une grille : le graticule est constitué de 10 divisions horizontales et 8 verticales de 1 cm. Des sous divisions peuvent apparaître et d'autres sont certaines fois repérées en % pour mesurer les temps de montée étudiés plus loin.

Comme nous l'avons vu, le phosphore (couche fluorescente) émet une lumière une fois frappée d'électrons, mais après la disparition du faisceau, il continue de luire encore, cela est appelé la *persistance* et varie selon le type de phosphore.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Le signal d'entrée est appliqué aux plaques de déviation verticales et l'oscilloscope de lui même balaye le faisceau au travers de l'axe horizontal. La trace est la reproduction du signal d'entrée (signal mesuré) sur le spot à l'écran.

A.2) Commandes à régler

Intensité : règle la luminosité de l'affichage ils possèdent un circuit qui ajuste automatiquement l'intensité pour les différentes vitesses de balayage. Lorsque le faisceau se déplace vite, le phosphore est excité pendant un temps plus court ; il faut alors augmenter l'intensité pour visualiser la trace. Lorsqu'il se déplace lentement, le spot devient très brillant et l'on doit alors baisser l'intensité pour éviter au phosphore de brûler et assurer ainsi la longévité du tube (principe similaire : fond d'écran sur un PC).

Réglage conseillé : à mi-course en général mais certains oscilloscopes sont préréglés correctement.

Focus (mise au point) : il contrôle la finesse de la trace, à noter que certains oscilloscopes se chargent eux-mêmes des réglages.

Réglage conseillé : les oscilloscopes sont préréglés correctement sinon tournez à fond sur la droite.

B) Commandes du système vertical

B.1) Rappel du fonctionnement

Comme nous l'avons vu, l'oscilloscope possède un système de déviation (2 plaques) horizontal et vertical, un canon à électrons par l'intermédiaire duquel est contrôlée l'intensité du faisceau émis.

La commande du système de déviation verticale est composée :

– d'un atténuateur d'entrée (un par voie) ;
– d'un commutateur électronique pour sélectionner la voie d'entrée ;
– d'un amplificateur de déviation.

B.2) Réglages à effectuer

Sensibilité des voies : objectif : mesure du signal d'entrée pour l'afficher à l'écran. Tout signal doit pouvoir apparaître à l'écran, donc il faudra amplifier les signaux très faibles en amplitude et atténuer les signaux très fortement élevés en tension crête. Pour avoir une lecture correcte sur le graticule.

C'est le rôle de la sensibilité ou atténuateur (*figure 4.27*). On la mesure en volts par division.

Sur la plupart des oscilloscopes, le pas de contrôle de sensibilité est de 1-2-5, c'est-à-dire de 10 mV/div ; 20 mV/div, 50 mV/div, 100 mV/div, etc.

On agit sur la sensibilité à l'aide des commandes d'amplitude monter/descente en tournant le commutateur de sensibilité verticale.

La commande VAR (variable) ajuste le pas en continu pour avoir un signal correct à l'écran (se reporter au chapitre correspondant).

Sur des oscilloscopes récents, la sensibilité est variable en continu entre un mini et un maxi mais reste étalonnée grâce à une technique moderne utilisée pour le contrôle et la mise à l'échelle, et de plus apparaît à l'écran.

Sur d'autre un **réglage fin** permet d'obtenir les calibres intermédiaires permettant au mieux, une exploitation du relevé.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

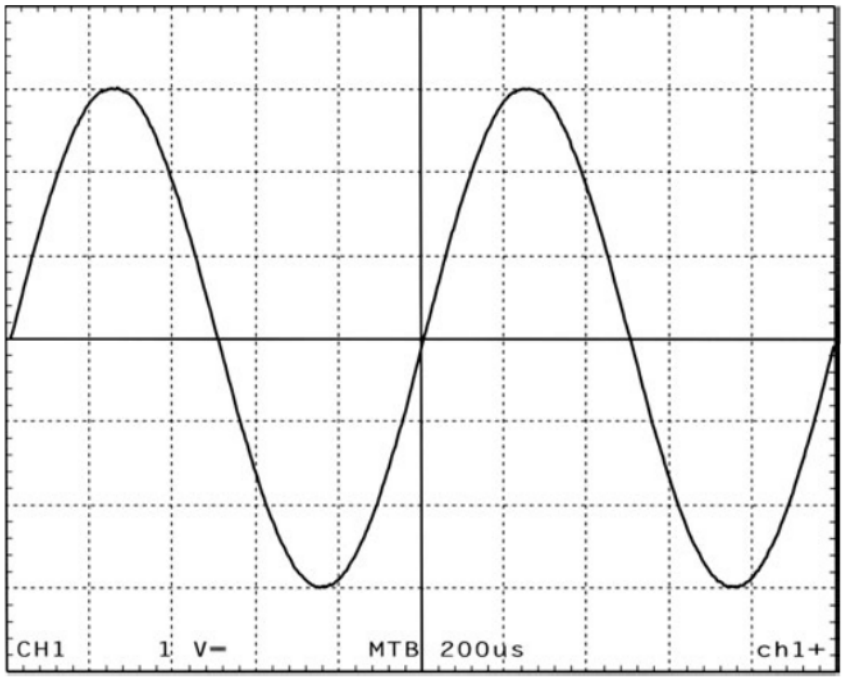


Figure 4.27 – Réglage conseillé : le signal crête de notre exemple de 325 V doit tenir dans 4 divisions. La sensibilité retenue sera de 100 V/div soit 3,25 divisions en utilisant une sonde différentielle 1/100 et en configurant nos calibres voie 1 en × 100. On lit en fonction de la sensibilité choisie et du nombre de divisions.

Couplage : la commande du couplage définit la manière dont le signal d'entrée est transmis au système de déviation verticale pour la voie concernée : les couplages DC (continu) et AC (alternatif).

Le *couplage DC* assure la connexion directe du signal (*figure 4.28*).

Les composantes AC et DC sont transmises à l'écran.

Le *couplage AC* insère une capacité en série entre le connecteur BNC et l'atténuateur. Toute composante continue est annulée. Les composantes basses fréquences AC sont aussi fortement atténuées, voire supprimées.

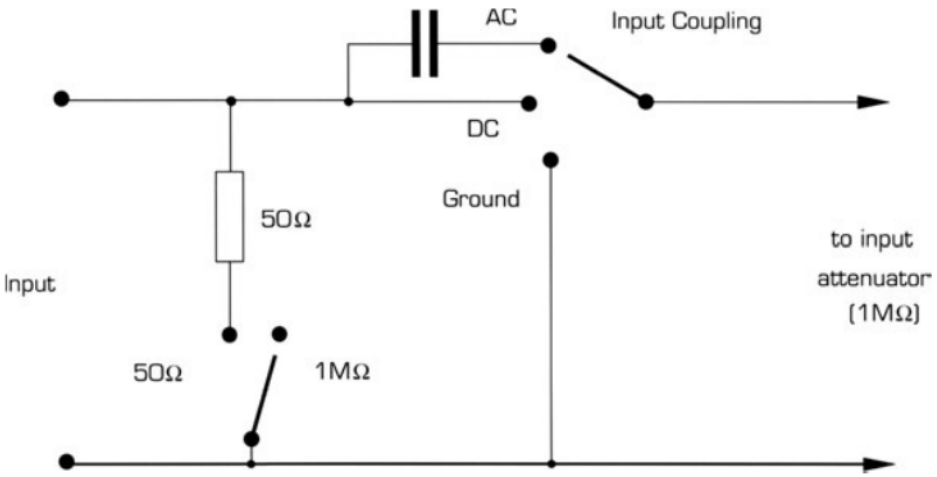


Figure 4.28 – Mode de sélection du couplage d'entrée : AC, DC et *ground*.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

La fréquence de coupure est celle pour laquelle le signal est affiché à seulement 71 % de son amplitude réelle. La fréquence de coupure basse dépend en tout premier lieu de la capacité de couplage d'entrée typiquement de 10 Hz.

La position de la masse (*ground*) est également associée à cette commande. Elle permet de déconnecter le signal d'entrée de l'atténuateur et de relier l'entrée de l'atténuateur à la masse de l'oscilloscope.

On voit apparaître à l'écran une ligne permettant de recaler le zéro volt avec le zéro volt du graticule, permettant de référencer notre signal par rapport à la masse (origine).

Réglage conseillé : pour notre application, la valeur moyenne du signal étant nulle, le couplage n'aura aucune influence mais nous vous conseillons de rester en DC sauf dans le cas précis où l'on veut annuler la valeur moyenne afin de quantifier l'ondulation d'un signal. Surtout, le fait de rester en couplage AC annulerait toute valeur moyenne, et relever une tension continue en couplage AC reviendrait à trouver une tension nulle !

Impédances d'entrées : la plupart des oscilloscopes ont une impédance d'entrée de 1 mégohm (1 MΩ) en parallèle avec environ 25 pF, ce qui est acceptable pour la plupart des applications d'ordre général, car elle ne procure qu'une faible charge sur la plupart des circuits.

Certains signaux proviennent de sources avec une impédance de sortie de 50 Ω Pour mesurer ces signaux de façon précise et éviter toute distorsion, il faut assurer un acheminement et une terminaison corrects. On utilise des câbles avec une impédance caractéristique de 50 Ω et terminés par une charge de 50 Ω.

Cette fonction de charge intégrée à l'oscilloscope peut être un plus, mais ne peut être mise en œuvre avec certaines sondes, il faut être vigilant quant à la mise en œuvre accidentelle.

Réglage conseillé : dans notre cas aucune adaptation d'impédance à réaliser.

Position (*figure 4.29*) : la commande de la position verticale ou POS positionne la trace sur l'écran sur l'axe des Y. Le niveau de référence apparaît en sélectionnant GROUND pour le couplage d'entrée sur la voie correspondante. Pour les plus récents le niveau de référence apparaît à l'écran sur l'onde du signal.

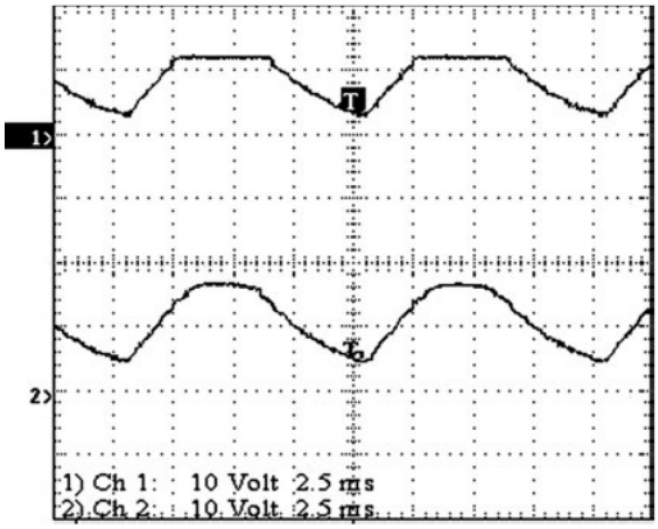


Figure 4.29 – Commande POS.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Réglage conseillé : positionner la seule courbe au zéro, au milieu du graticule sur l'axe des Y.

Autres commandes n'intervenant pas dans notre application mais qui peuvent être utilisées dans d'autres applications :

Gamme dynamique : c'est l'amplitude maximale du signal pouvant être entièrement visualisée sans distorsion même en changeant sa position verticale.

Addition (ADD) et inversion (INVERT) : additionner deux signaux pour sommer deux tensions peut ne présenter que peu d'intérêt, mais le fait d'en inverser un sur les deux et de les ajouter revient à réaliser une soustraction. Cette opération s'avère utile pour supprimer les interférences dues au mode commun ou pour réaliser des mesures différentielles.

Mode découpé (CHOP) et mode alterné (ALT) : par définition, le tube affiche une seule trace à la fois. Cependant, pour de nombreuses applications, les signaux sont souvent comparés pour étudier, par exemple, la tension d'entrée et de sortie. Pour cela, le faisceau d'électrons peut être orienté de deux façons :

– Soit représenter la trace complète puis l'autre : appelé mode alterné (ALT) convient pour les fréquences plus élevées nécessitant des réglages de bases de temps plus rapides.
– Soit dessiner les traces par morceau en passant de l'une à l'autre ou en découpant très rapidement : c'est le mode découpé ou CHOP (de *chopper*, hacheur en anglais) : il représente deux traces dessinées pendant un balayage, morceau par morceau.

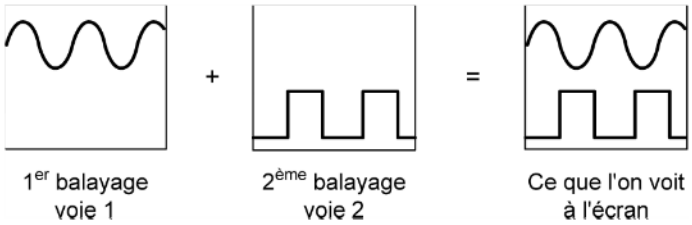


Figure 4.30 – Représentation alternée (ALT).

Très adapté aux signaux basse fréquence à des vitesses de bases de temps lentes puisque le hacheur passe de l'une à l'autre.

Les oscilloscopes actuels sélectionnent en fonction de la valeur du calibre de la base de temps tel ou tel mode. De façon à donner le meilleur affichage possible.

C) Commandes du système horizontal

C.1) Rappel du fonctionnement

La commande du système de déviation horizontale est composée :

– d'une base de temps ;
– d'un circuit de déclenchement ;
– d'un amplificateur de déviation ;
– l'intensité est gérée électroniquement pour activer ou non, la trace au bon moment dans le temps.

C.2) Réglages à effectuer : base de temps

Pour tracer une courbe en deux dimensions, l'oscilloscope comme nous a besoin de deux informations verticale et horizontale : l'oscilloscope a pour but de tracer

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

les signaux en fonction du temps et donc il faut que le tracé en fonction de l'axe des X soit proportionnel au temps.

Le système de contrôle de déviation de l'axe horizontal est appelé **base de temps**.

L'oscilloscope est composé d'un générateur de balayage précis. Il balaye le faisceau d'électrons sur l'écran à des vitesses choisies par l'utilisateur ; la *figure 4.31* montre la sortie du générateur de la base de temps.

La vitesse de balayage est mesurée en secondes par division (s/div) ; la gamme classique va de 20 ns/div à 0,5 s/div.

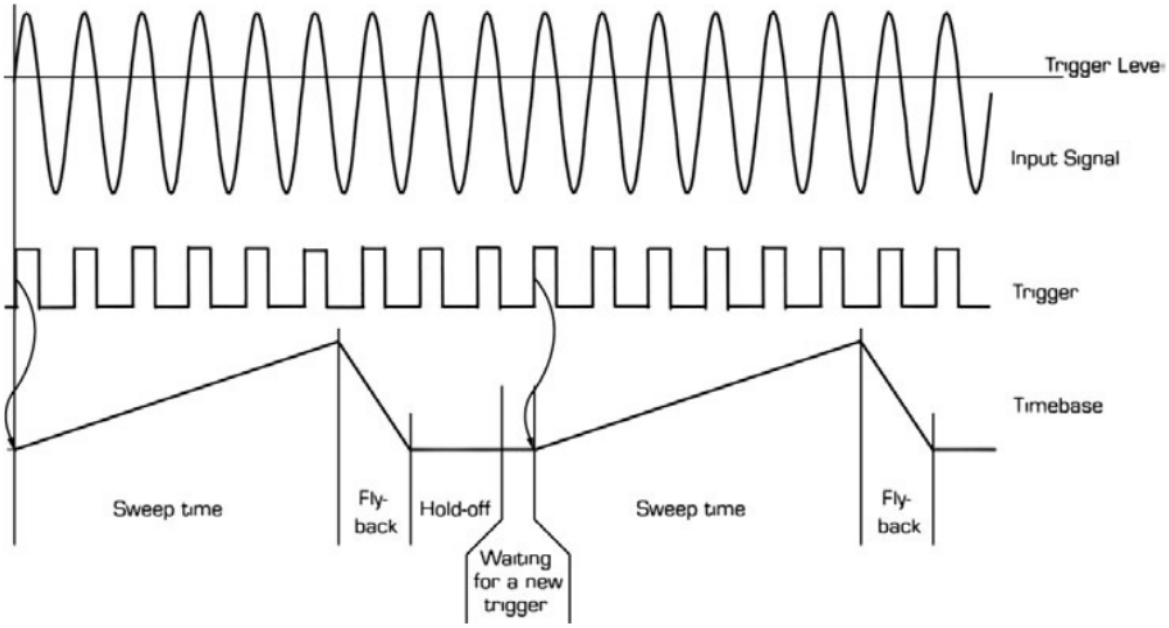


Figure 4.31 – Sortie du générateur de la base de temps.

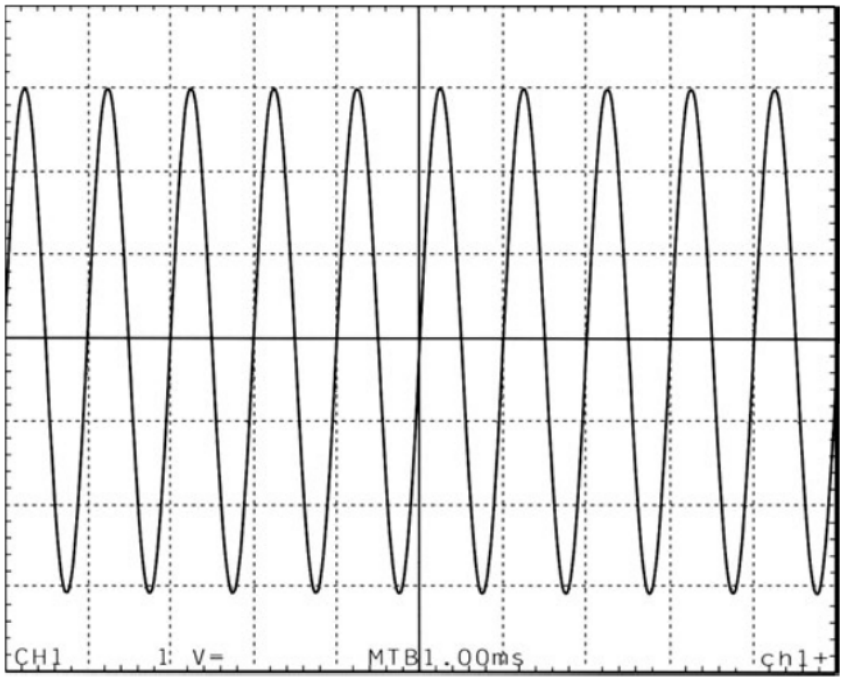


Figure 4.32 – Base de temps 1 ms.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Ces vitesses de balayage suivent aussi des séquences 1-2-5 comme la commande de sensibilité.

Une fois connu le temps représenté par chaque division de graticule, on peut mesurer le temps entre deux points d'une trace.

Réglage conseillé : pour notre exemple, la *figure 4.33* montre la sinusoïde de 50 Hz (la période de 20 ms doit tenir sur 10 divisions), la base de temps affichée sera de 5 ms/div.

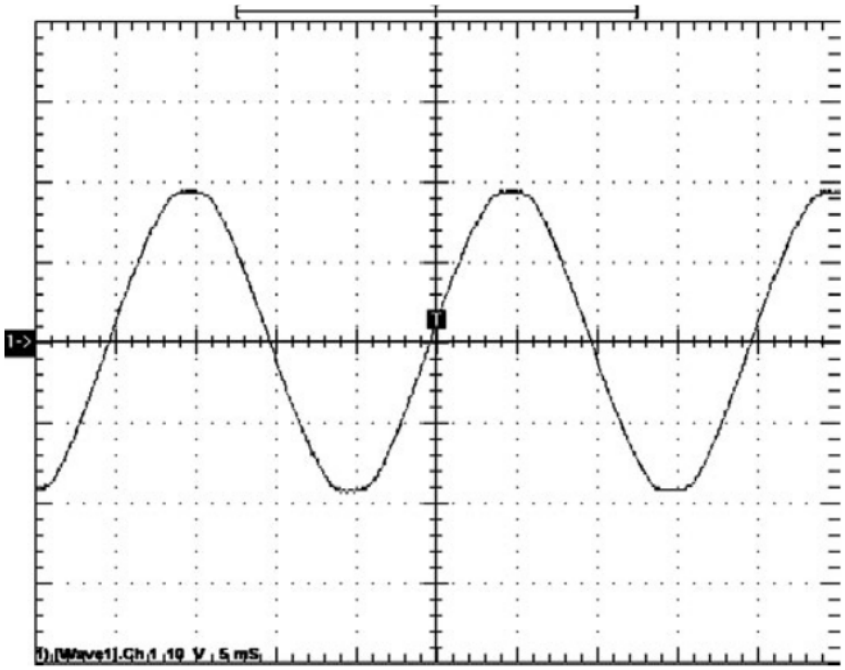


Figure 4.33 – Base de temps 5 ms.

Contrôle de position ou utilisation de curseurs : le contrôle de position X-pos horizontal ou axe X déplace horizontalement la trace sur l'écran, cela permet d'aligner la trace avec une ligne verticale pour une lecture plus précise en ayant un point d'origine précis.

Les curseurs peuvent être placés en temps pour encadrés et donner la valeur de la période du signal.

Base de temps variable : il est possible de choisir des vitesses de balayage différentes des séquences 1-2-5 ce qui permet l'insertion d'une période de n'importe quel signal sur l'écran tout entier.

La plupart des oscilloscopes récents fonctionnent en mode étalonné continûment variable cela permet d'obtenir une meilleure résolution des mesures de temps car l'écran tout entier peut servir à afficher la partie du signal concerné. Il réduit les risques d'erreur.

Expansion horizontale de la base de temps : elle amplifie le balayage de déviation horizontale (facteur 10), ainsi on peut passer de 20 ns/div à 2 ns/div ; l'écran est désormais une fenêtre et l'on peut déplacer le signal à volonté comme le montre la *figure 4.34*.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

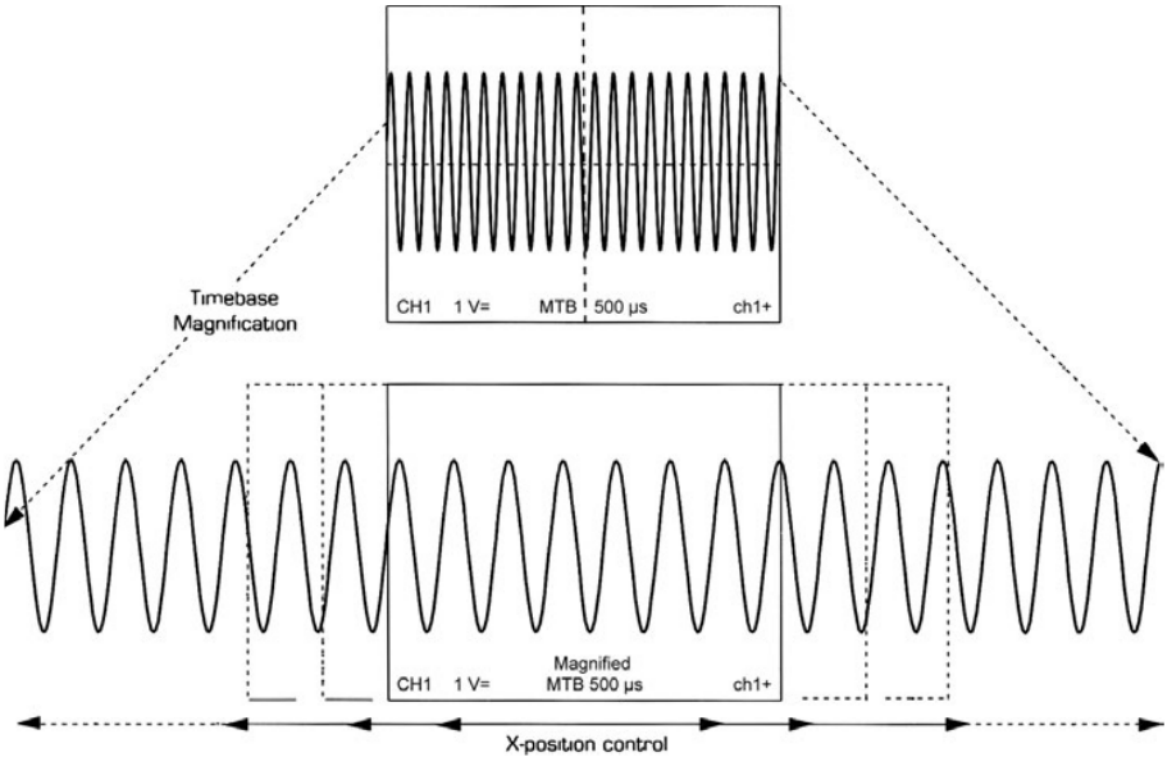


Figure 4.34 – Expansion horizontale de la base de temps et contrôle de position X.

Double base de temps : dans bon nombre d'applications de signaux complexes, on doit visualiser une partie d'un signal (par exemple un signal d'une ligne vidéo) ; le déclenchement normal de la base de temps ne suffira pas, c'est pourquoi on trouve une double base de temps.

Il est possible de faire déclencher la base de temps principale (MTB pour *main time base*) sur un événement de déclenchement majeur du signal (par exemple synchronisation vidéo) ainsi qu'une deuxième base de temps retardée appelée *delay time base* qui déclenchera sur le démarrage d'un autre événement du signal de la MTB (événement en surbrillance) avec son propre réglage de la base de temps.

D) Commandes du système de déclenchement

Nous avons vu comment le signal d'entrée était utilisé pour la déviation verticale et comment la base donnait la déviation horizontale. Mais voilà comment fait le faisceau d'électrons pour suivre exactement le même trajet à chaque passage à l'écran.

La réponse réside dans le circuit de déclenchement. Sans celui-ci, on ne verrait que des signaux non synchronisés aux points de départ aléatoires.

À chaque balayage de l'écran par la base de temps, le circuit de déclenchement permet son démarrage à un point bien précis du signal d'entrée et ce point est sélectionné grâce aux commandes suivantes :

- Source de déclenchement.
- Niveau de déclenchement.
- Mode de déclenchement.
- Front de déclenchement.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

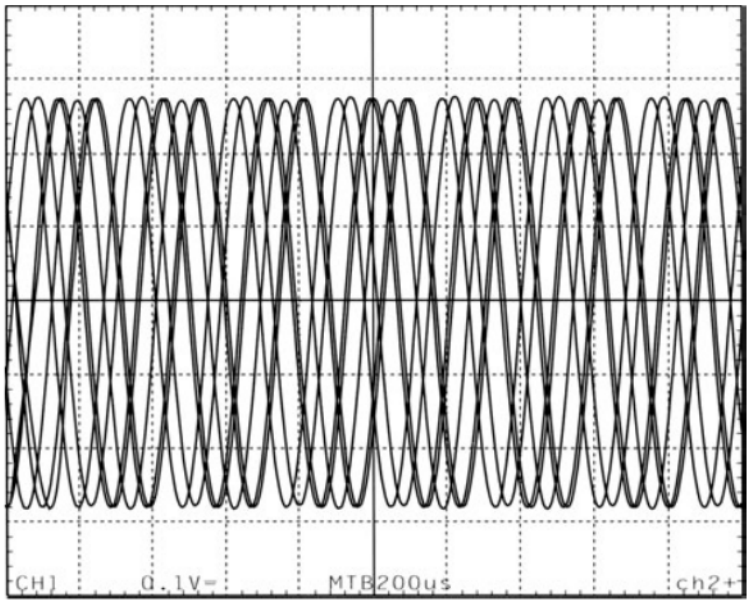


Figure 4.35 – Signaux non synchronisés.

– Couplage de déclenchement.
– Temps mort de déclenchement (*trigger hold-off*).
– Déclenchement sur base de temps retardée.

Source de déclenchement : elle définit d'où vient le signal de déclenchement, il s'agit dans la plupart des applications du signal à l'entrée d'une des deux voies, il suffira de sélectionner la voie en question (CH1 ou CH2).
Mais on peut aussi déclencher l'oscilloscope en fonction :

– d'un signal EXTERNE venant d'un GBF par exemple (BNC nommée EXT.) que l'on sélectionnera ;
– d'un signal LINE ou ligne permettant de se synchroniser par rapport à la fréquence du secteur. C'est un bon moyen pour mettre en évidence les interférences du secteur.

Réglage conseillé : dans le cas de notre mesure, on pourra soit sélectionner un déclenchement sur la voie utilisée exemple CH1 soit en mode Line pour avoir une synchronisation calée sur le secteur 50 Hz.
Niveau de déclenchement : sur la source de déclenchement choisie, cette commande permet de régler le niveau de tension (appelé LEVEL) nécessaire pour que le circuit de déclenchement démarre la base de temps.
Mode de déclenchement : le circuit de base de temps d'un oscilloscope analogique possède plusieurs types de fonctionnement :

– automatique (AUTO) ;
– normal ou déclenché (TRIGGERED) ;
– simple ou monocoup (SINGLE ou SINGLE SHOT).

Normal : la base de temps doit être déclenchée pour obtenir une trace. Pas de signal, pas de trace. Un signal d'entrée doit être associé à la source de déclenchement choisie, suffisamment important pour déclencher la base de temps. En son absence il n'y aura aucune trace à l'écran.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

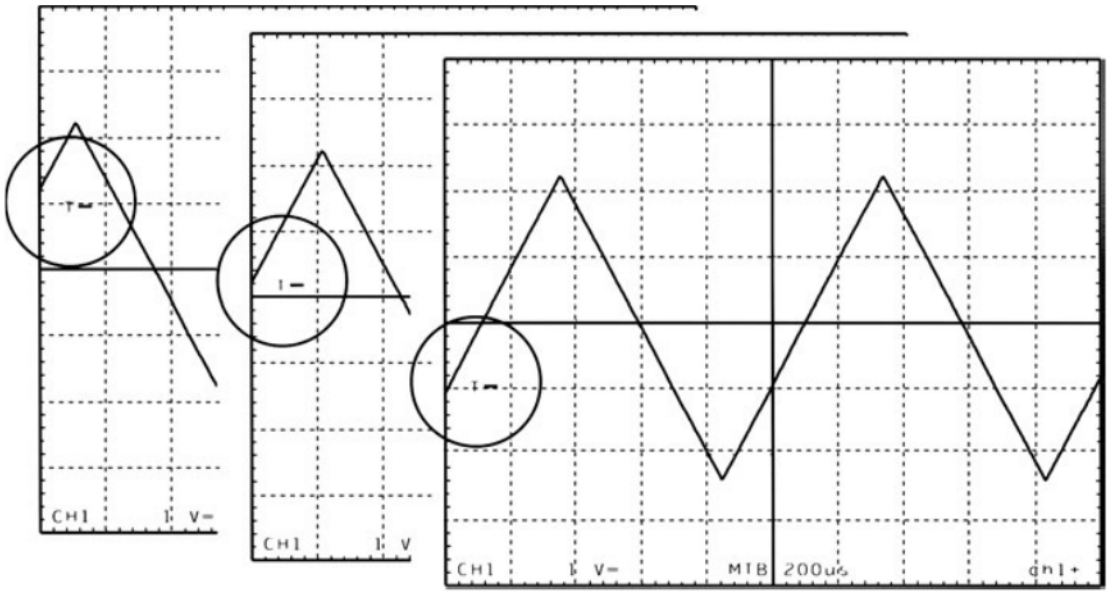


Figure 4.36 – Trois réglages différents du niveau de déclenchement.

Automatique : nécessaire pour voir la trace même en l'absence du signal d'entrée. Sans signal sur lequel déclencher, le mode automatique permet d'avoir une trace à l'écran. Cela permet de régler la position verticale, par exemple si l'on a uniquement une tension continue.

Simple ou monocoup : la base de temps principale balaiera à réception d'un déclenchement (à une valeur prédéterminée par l'utilisateur) et ne le fera qu'une fois. Le circuit de déclenchement devra être « armé » c'est-à-dire reprogrammé pour chaque déclenchement souhaité en appuyant sur la touche « single ou reset ou ready ». Les oscilloscopes actuels affichent le *level* ou niveau de déclenchement en volt à l'écran. Le début du déclenchement est à régler par le potentiomètre « position horizontale ».

Réglage conseillé : le signal étant périodique, sélectionnez le mode automatique et stoppez vous-même l'oscilloscope. Le mode monocoup peut fonctionner en réglant le *level* ou niveau à une valeur positive non nulle.

Front de déclenchement : la commande Slope (front) définit le déclenchement sur un front montant positif ou descendant ou négatif du signal source.

Réglage conseillé : front montant.

Couplage de déclenchement : c'est la manière dont le signal source accède au circuit de déclenchement :

– Couplage DC : le signal source est directement connecté au circuit de déclenchement.
– Couplage AC : le signal source est connecté au circuit de déclenchement par l'intermédiaire d'une capacité en série (annulation de la composante continue).
– Niveau crête-crête : le champ d'action de la commande du niveau de déclenchement est réglé pour être légèrement plus faible que la valeur crête-crête du signal source, il est donc impossible de définir le niveau de déclenchement en dehors de la valeur du signal d'entrée, ainsi le signal déclenchera toujours l'oscilloscope.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Réjection HF (HF rej) : le signal traverse un filtre passe-haut pour éliminer les basses fréquences, ceci permet même d'afficher un signal possédant beaucoup d'oscillations résiduelles.
– Mode TV (TV triggering) : le contrôle de niveau n'est plus actif, l'oscilloscope réagira en fonction de la synchronisation du signal vidéo, il en existe deux modes TVF (déclenchement sur trame) et TVL (déclenchement sur ligne) non traités dans l'ouvrage.

Réglage conseillé : couplage DC.
Autres fonctions à titre d'indications, non utilisé dans notre exemple de mesure :
Temps mort de déclenchement (*trigger hold-off*) : certains signaux possèdent de nombreux points de déclenchement possibles (signal numérique *figure 4.37*) bien qu'ils soient répétitifs sur une période de temps plus longue, il n'en est pas de même sur un temps plus court. Pour cela il faut examiner quelques impulsions et la base de temps doit aller plus vite mais la partie du signal change d'un balayage à l'autre, pour cela le temps mort de déclenchement permet de retarder le temps entre deux balayages et permettre de déclencher toujours sur le même front.

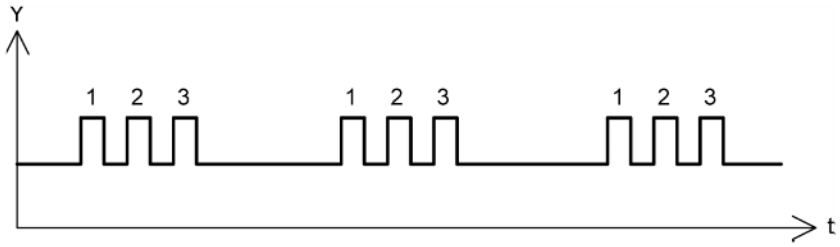


Figure 4.37 – Déclenchement retardé sur un front souhaité.

Sans la fonction Hold-off, l'oscilloscope pourra se déclencher sur le 1er, 2e ou 3e front et ceci d'une manière aléatoire ce qui aura pour résultat la visualisation instable du signal.
Pour éviter cet inconvénient, le réglage du temps d'inhibition du balayage permettra à l'utilisateur de déclencher toujours sur le même front (1er, 2e ou 3e).
Déclenchement sur base de temps retardée : *figure 4.38*.

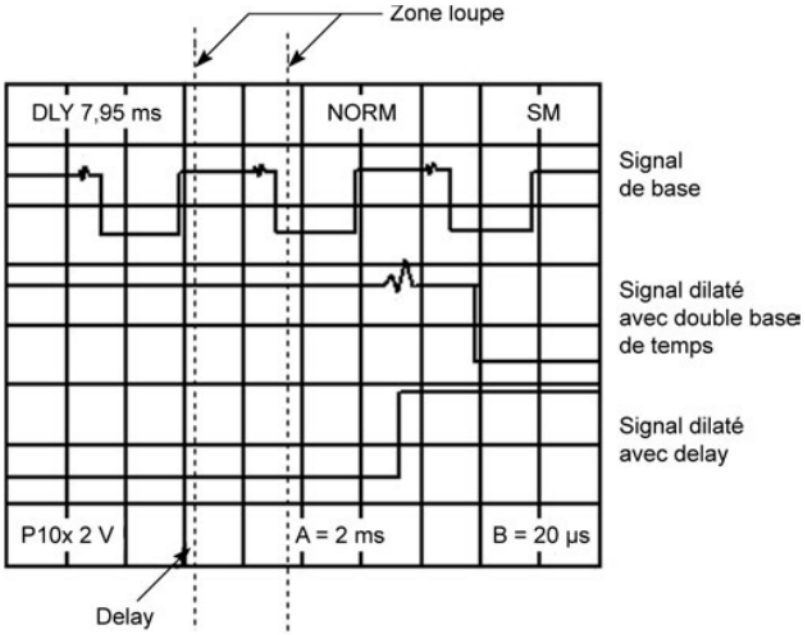


Figure 4.38 – Déclenchement sur base de temps retardée déclenchée : le déclenchement est retardé de façon réglable comme sur la figure 4.37 mais le déclenchement ne se fera qu'après la détection d'un nouvel événement en entrée.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

E) Commandes des fonctions supplémentaires

Déviation X-Y (mode X-Y) : la base de temps est désactivée, un signal d'entrée différent de celui utilisé pour la déviation verticale est utilisé pour dévier le faisceau d'électrons dans la direction horizontale cela signifie que les deux signaux d'entrée vont être exprimés l'un en fonction de l'autre.

La relation de phase entre les deux signaux constitue l'application principale de cette méthode.

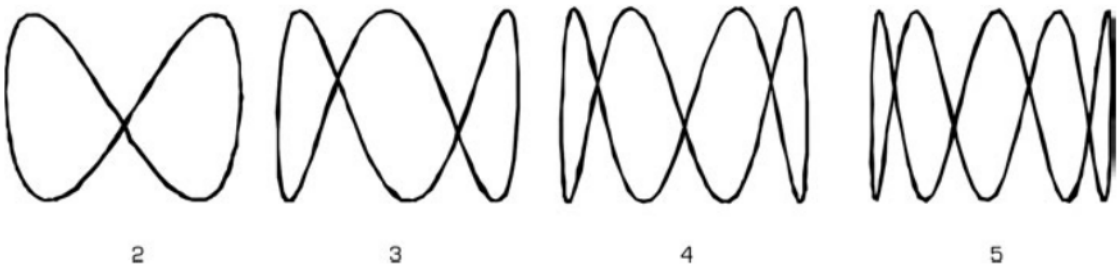


Figure 4.39 – Diagrammes (ou figures) de Lissajous résultant d'ondes sinusoïdales de fréquences en relations harmoniques.

Ligne à retard : bien que la ligne à retard fasse partie du système de déviation vertical nous allons à présent aborder ce sujet après avoir vu le système de déviation horizontal et de déclenchement et leur influence.

En effet bien que rapides, les circuits de déclenchements et de base de temps ont un certain temps de réponse à une condition de déclenchement validée.

De même que la base de temps est non linéaire au départ de chaque balayage jusqu'à ce que la vitesse maximum de balayage soit atteinte.

Pour les oscilloscopes à bande passante élevée (2 ns/div) ce temps de réponse n'est pas négligeable. Or il faut déclencher la base de temps avant que l'événement de déclenchement du signal n'apparaisse à l'écran.

Le faisceau balaye déjà lorsque l'information de déclenchement du signal arrive sur les plaques de déviation.

Cela est possible grâce à une ligne à retard dans le système de déviation vertical après le circuit de déclenchement et avant l'amplificateur final.

Lorsque le signal arrive en bout de ligne à retard, la base de temps a été démarrée et le balayage commence.

☐ Organigramme récapitulatif d'aide à l'utilisation d'un oscilloscope

L'organigramme d'aide à l'utilisation ci-après peut permettre au novice, d'utiliser correctement l'oscilloscope afin de le régler sans perte inutile de temps voire éviter tout dérèglement de l'appareil parfois rencontré chez de nouveaux utilisateurs.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

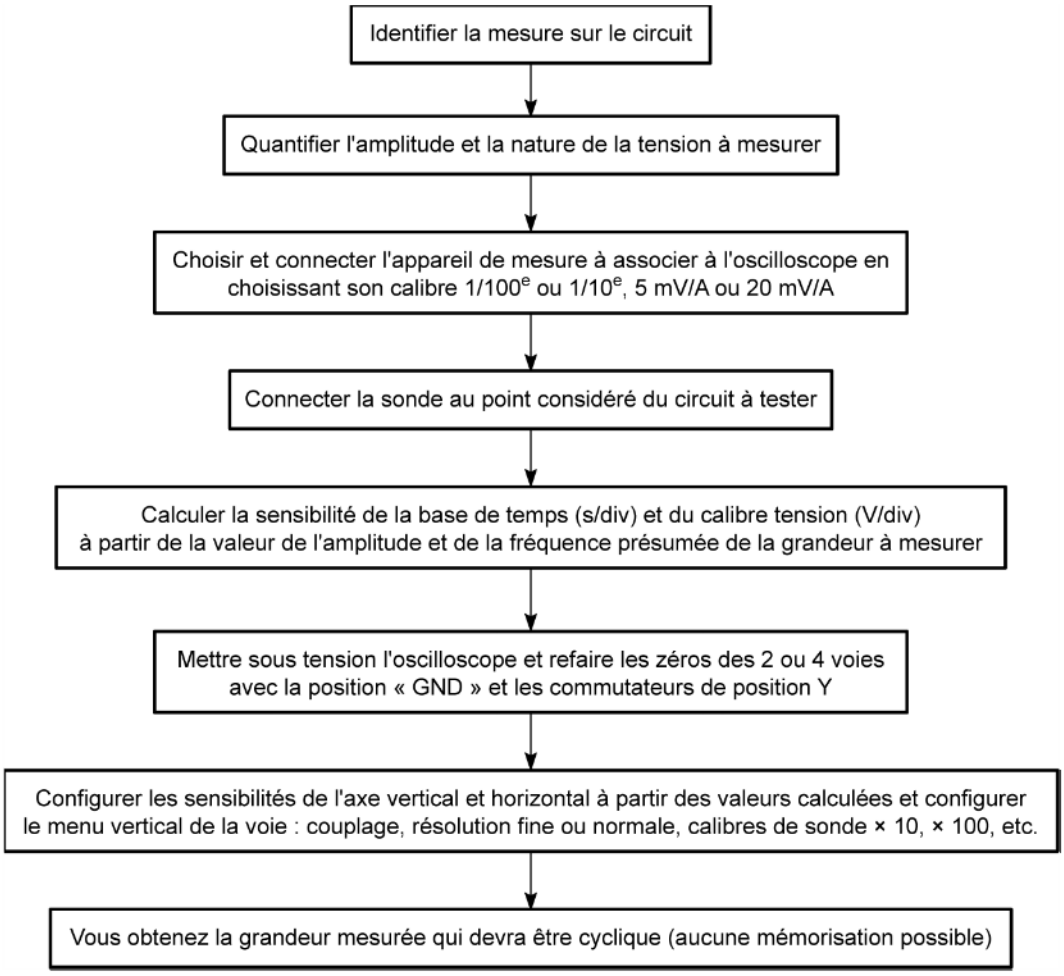


Figure 4.40 – Aide à l'utilisation d'un oscilloscope.

■ Choix d'un oscilloscope analogique

□ Les pièges à éviter

– Examiner les caractéristiques de sensibilité et de bande passante en fonction de votre application.
– Vérifier si la spécification de bande passante est garantie quelle que soit la sensibilité d'entrée.

Rappel : qu'est-ce que la bande passante ?

C'est la particularité la plus importante de tout oscilloscope. Elle reproduit la réponse fréquentielle du système vertical de l'oscilloscope.
Elle est définie comme étant la fréquence maximale pouvant être affichée avec une variation d'amplitude inférieure à ± 3 dB par rapport au signal d'entrée.
À –3 dB, le signal affiché $V_{affichée}$ représente 71 % du signal réel à l'entrée $V_{entrée}$.
Rappels mathématiques :

$$dB(V) = 20 \log (V_{affichée}/V_{entrée})$$

$$-0{,}15 = \log (V_{affichée}/V_{entrée})$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

$$10 - 0{,}15 = (V_{affichée}/V_{entrée})\ s$$

$$\text{soit } V_{affichée} = 0{,}71 V_{entrée}$$

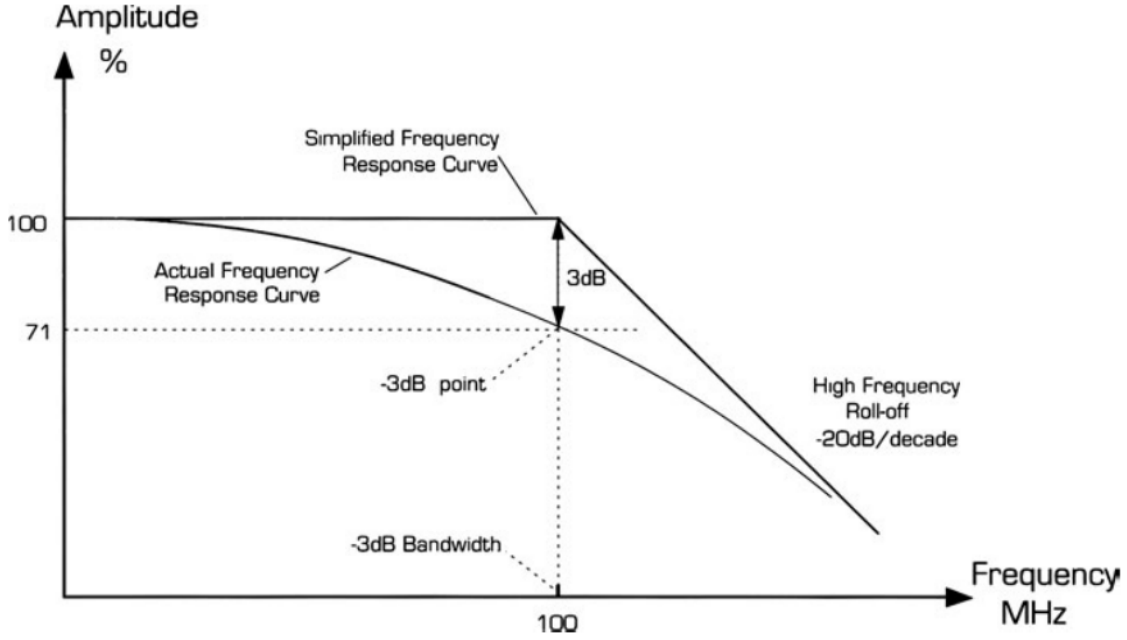


Figure 4.41 – Courbe de réponse typique d'un oscilloscope 100 MHz.

Pour des raisons de simplification on considérera comme constante jusqu'à la fréquence de coupure et ensuite décroissante avec une pente de 6 dB par octave (soit 20 dB par décade) à partir de cette fréquence.

Il en est tout autrement car en réalité la sensibilité de l'atténuateur décroît à partir des fréquences basses et arrive à – 3 dB à la fréquence de coupure.

Limiteur de bande passante : certains oscilloscopes à bande passante élevée sont pourvus d'un limiteur de bande passante permettant de rejeter certaines fréquences afin d'éviter des niveaux de bruit et d'interférence pendant une mesure à haute sensibilité.

– Faire la différence entre un oscilloscope possédant une vraie double base de temps avec un oscilloscope possédant un déclenchement retardé.
– Examiner l'ergonomie du produit avec attention, elle facilite souvent l'utilisation pratique de l'oscilloscope.
– Analyser les différentes tensions d'accélération (ou de montée) des différents modèles. Pour des oscilloscopes de même bande passante, plus la tension d'accélération est élevée, meilleur est le contraste obtenu à l'écran. La méthode de post-accélération a aussi son importance dans l'aspect final de l'écran.
– Comparer les services et supports techniques proposés par les différentes entreprises : durée de garantie, délai d'intervention, compétence, implantation, etc.

Rappel : comment évaluer le temps de montée ?

Le temps de montée est directement lié à la bande passante et définit généralement comme le temps de transition entre 10 et 90 % de la valeur finale du signal.

Pour un oscilloscope c'est en théorie la transition la plus rapide qui puisse être affichée.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

La réponse haute fréquence d'un oscilloscope a une courbe bien définie.

Ainsi les signaux présentant un niveau d'harmoniques élevé, tels que les signaux carrés sont correctement reproduits

Si la pondération est trop rapide, il peut en résulter une oscillation sur les fronts de montée rapide.

Si elle est trop lente (elle démarre trop tôt sur la courbe de réponse en fréquence) c'est la réponse en haute fréquence qui sera touchée en contrepartie et les signaux carrés en seront affectés.

Cette courbe de réponse est la même pour tous les oscilloscopes d'usage général, ainsi on peut définir la relation entre la bande passante et le temps de montée par la formule suivante :

$$Tm\ (\text{ns}) = \frac{350}{BP\ (\text{MHz})}$$

avec *Tm* le temps de montée et *BP* la bande passante.

Pour les oscilloscopes 100 MHz, le temps de montée est de 3,5 ns sur le graticule se trouvent des lignes spéciales graduées 0 % et 100 % utilisée pour les mesures du temps de montée.

Le contrôle de la sensibilité VAR est utilisé pour aligner les points hauts et bas d'un signal testé avec des lignes 0 % et 100 %.

Le temps de montée le long de l'axe X est le temps mesuré entre l'intersection du signal avec les lignes de graticule 10 % et 90 %.

Attention pour mesurer le temps de montée d'un oscilloscope, la même procédure, à cette exception près, que le signal de test doit avoir un temps de montée au moins 5 fois plus rapide que celui de l'oscilloscope pour une erreur de 2 %.

Le temps de montée affiché est la combinaison du temps de montée de l'oscilloscope et celui du signal.

La relation est la suivante :

$$tm\ \text{affichée} = \sqrt{(tm\ \text{signal}^2 + tm\ \text{oscilloscope}^2)}$$

Conclusion : un organigramme de choix sera donné dans le chapitre oscilloscope numérique, qui reprendra d'ailleurs des notions évoquées juste avant.

4.4.3 Oscilloscopes numériques

Le choix d'un oscilloscope numérique demande de maîtriser quelques fonctionnalités qui font appel à des notions très techniques que nous rappellerons. Des exemples de relevés mettant en œuvre un grand nombre d'entre elles agrémenteront l'organigramme d'aide à l'utilisation de cet appareil souvent décrit comme complexe. Ensuite nous détaillerons les critères de choix d'un tel appareil.

■ Quelques rappels : qu'est-ce que le stockage numérique ?

C'est la mémorisation d'un signal dans un oscilloscope sous forme de code numérisé. Lorsqu'un signal entre dans un oscilloscope numérique (appelé DSO, *Digital Storage Oscilloscope*) et avant qu'il ne passe le circuit de déviation du tube cathodique, la tension est échantillonnée à intervalles de temps réguliers. Ces valeurs instantanées (ou échantillons) passent par un convertisseur analogique/numérique (CAN) et génèrent des mots binaires correspondant à chaque échantillon de tension. C'est ce que l'on appelle la numérisation. Ces valeurs sont stockées ensuite dans la mémoire numérique.

La vitesse à laquelle les échantillons sont prélevés s'appelle vitesse d'échantillonnage. Elle est contrôlée par l'horloge interne d'échantillonnage. Ces vitesses vont de

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

20 méga-échantillons/seconde (Méch/s) à 200 Méch/s. Les données mises en mémoire sont utilisées pour la reproduction et le traitement ultérieur à l'écran.

Dans un oscilloscope numérique il existe plus qu'un circuit analogique entre les connecteurs d'entrées et le tube cathodique, tout ce qui est perçu à l'écran n'est qu'une reproduction des valeurs acquises puis mémorisées au préalable contrairement à un affichage immédiat et continu.

☐ Synoptique d'un oscilloscope numérique

Un oscilloscope est constitué de différents éléments :

- tube cathodique ou écran ;
- amplificateur vertical ;
- base de temps ;
- amplificateur horizontal ;
- convertisseurs numérique/analogique et analogique/numérique ;
- mémoire ;
- circuit de déclenchement ;
- alimentation haute et basse tension.

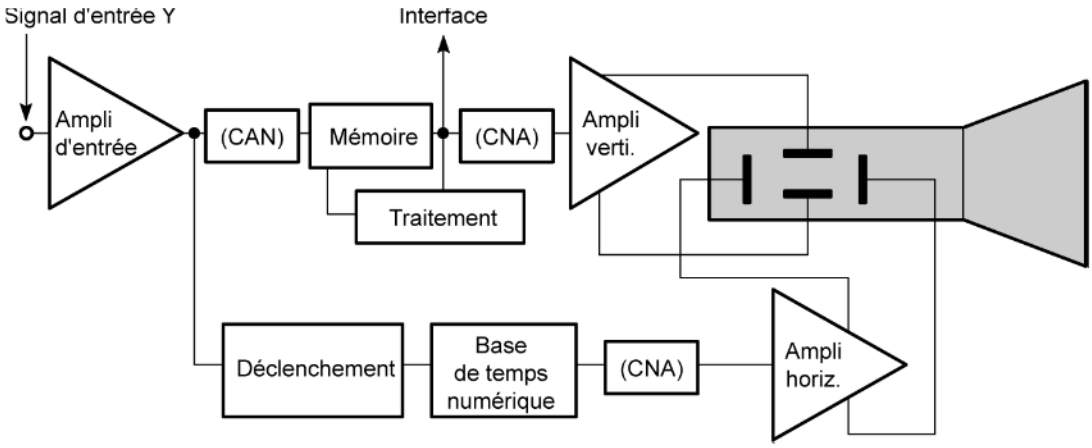


Figure 4.42 – Schéma synoptique d'un oscilloscope numérique.

☐ Quels sont les avantages du stockage numérique ?

Pour un signal « furtif » n'apparaissant qu'une seule fois par seconde, ou n'apparaissant qu'une seule fois, la persistance du phosphore vue au chapitre précédent (même du P7 de 300 ms) ne suffit plus.

Dans ces cas-là, l'oscilloscope analogique ne permet plus de capter et d'afficher le signal d'entrée.

Là intervient l'oscilloscope numérique pourvu de son stockage numérique apportant réponse à tous les problèmes évoqués mais qui, en plus, a les avantages suivants (liste non exhaustive) :

- Possibilité de réaliser des mesures automatisées avec ou sans curseurs.
- Traitements mathématiques des valeurs acquises (via logiciel d'acquisition ou logiciels grands publics).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Les signaux nouvellement acquis peuvent être comparés aux signaux de référence, automatiquement ou manuellement.
– Visualiser un grand nombre d'informations de déclenchement.
– Possibilité de stocker des signaux sans limite dans le temps.
– Transfert vers un PC pour traiter puis stocker, voire même faire intervenir le PC dans l'oscilloscope (voir chapitre nouveautés !).
– Recopie d'écrans sur imprimantes pour constituer des documentations, dossier d'essais, archivages, etc.

☐ Les fonctionnalités propres aux numériques et quelques rappels théoriques

Échantillonnage et numérisation

Le stockage numérique est effectué en deux temps.
Les échantillons sont prélevés sur la tension d'entrée par des échantillonneurs-bloqueurs (*figure 4.43*).

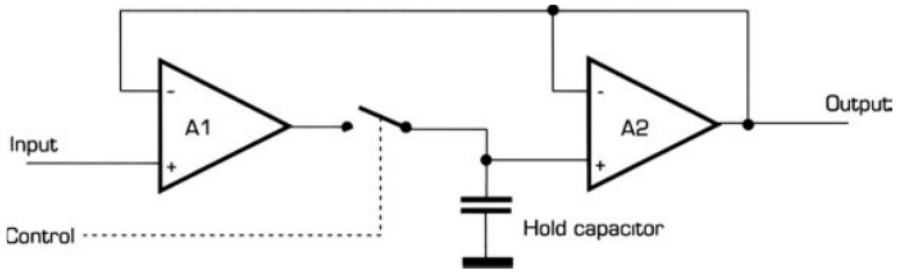


Figure 4.43 – Schéma de principe d'un échantillonneur-bloqueur.

L'amplificateur d'entrée A1 charge et décharge une capacité appelée capacité de maintien via un commutateur **S** lorsque celui-ci est fermé.
À l'ouverture de S, le niveau de tension ne change plus aux bornes de la capacité, la mémoire tampon A2 transmet cet échantillon au CAN (convertisseur analogique/numérique) lequel mesure l'amplitude de l'échantillon et le reproduit sous forme numérique.
Le CAN est dit « Flash » car il convertit en un éclair le signal d'entrée analogique en signal de sortie numérique. Il est constitué d'un réseau de comparateur, tous chargés de comparer à un signal de tensions de référence (de valeurs différentes entre elles) au signal échantillonné.
Le convertisseur doit déterminer l'amplitude de référence de l'échantillon en le comparant à un certain nombre de tensions de référence. Plus le convertisseur contient de comparateurs, plus la chaîne de résistances associées est longue et plus il est possible de reconnaître des niveaux de tensions différents et donc plus la résolution verticale est meilleure. Elle s'exprime en nombre de bits, c'est le total de bits composants le mot binaire, expression du signal de sortie.
Ce nombre est connu par l'expression suivante :

$$\text{nombre de niveaux} = 2^{\text{nombre de bits}}$$

La plupart des oscilloscopes utilisent des convertisseurs 8 bits soit 256 niveaux de tension pour décrire un signal (*tableau 4.1*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

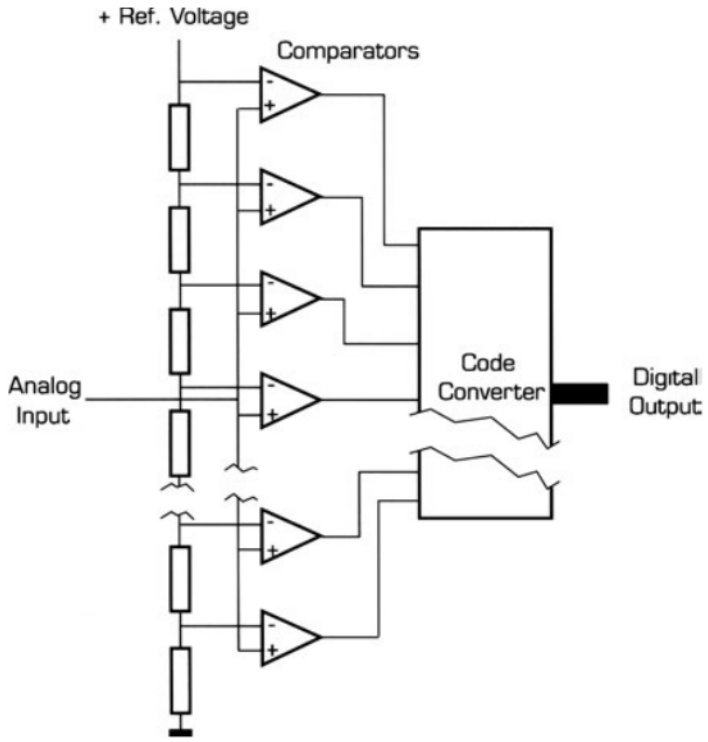


Figure 4.44 – Schéma de principe d'un convertisseur analogique/numérique.

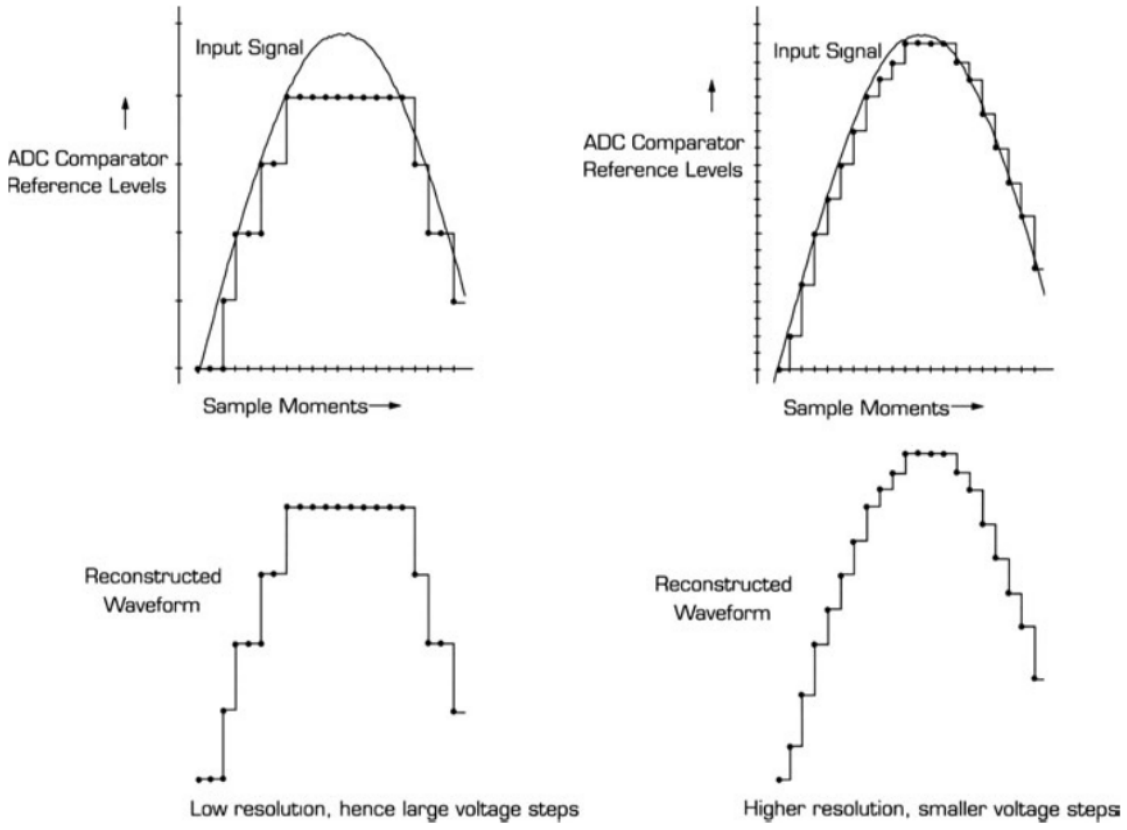


Figure 4.45 – Résolution verticale.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 4.1 – Courbe de réponse typique d'un oscilloscope 100 MHz.

Nombre de bits	Nombre de niveaux	Pourcentage d'erreur
1	2	50,000
2	4	25,000
3	8	12,500
4	16	6,250
5	32	3,125
6	64	1,562
7	128	0,781
8	256	0,391

La **résolution verticale** est liée directement à la capacité de conversion du convertisseur analogique/numérique (CAN).

Des CAN de 8 bits et de 10 bits auront respectivement une résolution de 1/256 et 1/1 024.

Le bit le plus significatif s'appelle MSB (*most significant bit*), le moins significatif s'appelle LSB (*last significant bit*).

La résolution correspond au LSB.

Remarque

Le principal obstacle à l'augmentation de la résolution tient du domaine économique car un bit gagné au niveau du mot de sortie requiert le doublement du nombre de comparateur et donc un convertisseur plus important, donc un espace plus important, une puissance plus importante… et donc un surcoût évidant.

Base de temps et résolution horizontale

Dans un oscilloscope numérique, la fonction du système horizontal est de s'assurer de l'acquisition d'un nombre suffisant d'échantillons au bon moment.

Tout comme pour les analogiques, la vitesse de la déviation horizontale dépend de la configuration de la base de temps (s/div).

Le groupe total d'échantillon est appelé enregistrement. Un enregistrement peut être utilisé pour reconstruire un ou plusieurs écrans. Le nombre d'échantillons pouvant être mémorisé est appelé longueur d'enregistrement ou longueur d'acquisition, exprimé en Ko (1 kilo-octet = 1 024 échantillons).

Généralement, les oscilloscopes affichent 512 échantillons sur l'axe horizontal. Pour la commodité d'emploi, ce nombre d'échantillons est affiché en résolution horizontale de 50 échantillons par divisions. Cela signifie que l'axe horizontal est d'une longueur totale de 512/50 = 10,24 divisions.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Le temps d'intervalle entre les échantillons peut être calculé de la manière suivante :

intervalle d'échantillonnage =
valeur de la base de temps (s/div)/nombre d'échantillons

Étant donné une configuration de base de temps de 1 ms/div et 50 échantillons par divisions, l'intervalle d'échantillonnage peut être calculé de la façon suivante :

intervalle d'échantillonnage = 1 ms/50 = 20 µs

La vitesse d'échantillonnage est la réciproque de cet intervalle d'échantillonnage :

vitesse d'échantillonnage = 1/intervalle d'échantillonnage

En général le nombre d'échantillons est invariable, le changement de la vitesse d'échantillonnage permet la modification de la base de temps. La vitesse d'échantillonnage spécifique est uniquement valable pour une configuration de bas de temps précise.

Pour des valeurs de base de temps plus faibles, on utilise une vitesse d'échantillonnage plus basse.

Étant donné un oscilloscope ayant une vitesse d'échantillonnage de 100 Méch/s, la valeur de base de temps, à laquelle la vitesse d'échantillonnage est utilisée est la suivante :

valeur de la base de temps : 50 échantillons

intervalle d'échantillonnage = $50/(100 \times 10^6)$ = 500 ns/div

Il est essentiel de connaître la base de temps qui est celle de l'acquisition la plus rapide des signaux non répétitifs. Elle donne la meilleure résolution possible ; cette valeur de base de temps est appelée « valeur de base de temps maximum en monocoup » pour laquelle on utilise la « vitesse d'échantillonnage maximum temps réel » c'est cette vitesse d'échantillonnage qui est prise en compte dans les spécifications de l'appareil.

Temps de montée utile

Beaucoup d'applications concernent la mesure des caractéristiques de commutations de signaux, c'est-à-dire les temps de montée et de descente.

Pour un analogique nous avions vu que c'était la transition entre deux états la plus rapide que l'appareil était capable d'effectuer.

Pour un numérique, la transition entre les deux états dépend du circuit analogique et de la résolution de temps.

Pour la mesure correcte d'un temps de montée, il est nécessaire d'avoir un nombre suffisant d'échantillons pendant la transition et cela dépend donc bien de la base de temps.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Fréquence maximum capturée, critère d'échantillonnage de Shannon

Lors des premières tentatives de numérisation des signaux, une étude montra que le recouvrement correct du signal nécessitait que l'horloge d'échantillonnage ait une fréquence au moins du double de la plus grande contenue dans le signal lui-même. C'est la théorie d'échantillonnage de Shannon.

Cependant, cette étude fut enrichie grâce aux théories des applications de communications, mais pas en pratique.

Si l'on regarde la *figure 4.46*, on s'aperçoit que l'on peut retrouver la fréquence d'un signal lorsque la fréquence d'échantillonnage est du double de celle du signal. Avec les propriétés de reconstruction appropriées, cela pourrait donner un signal ressemblant étroitement au signal d'origine.

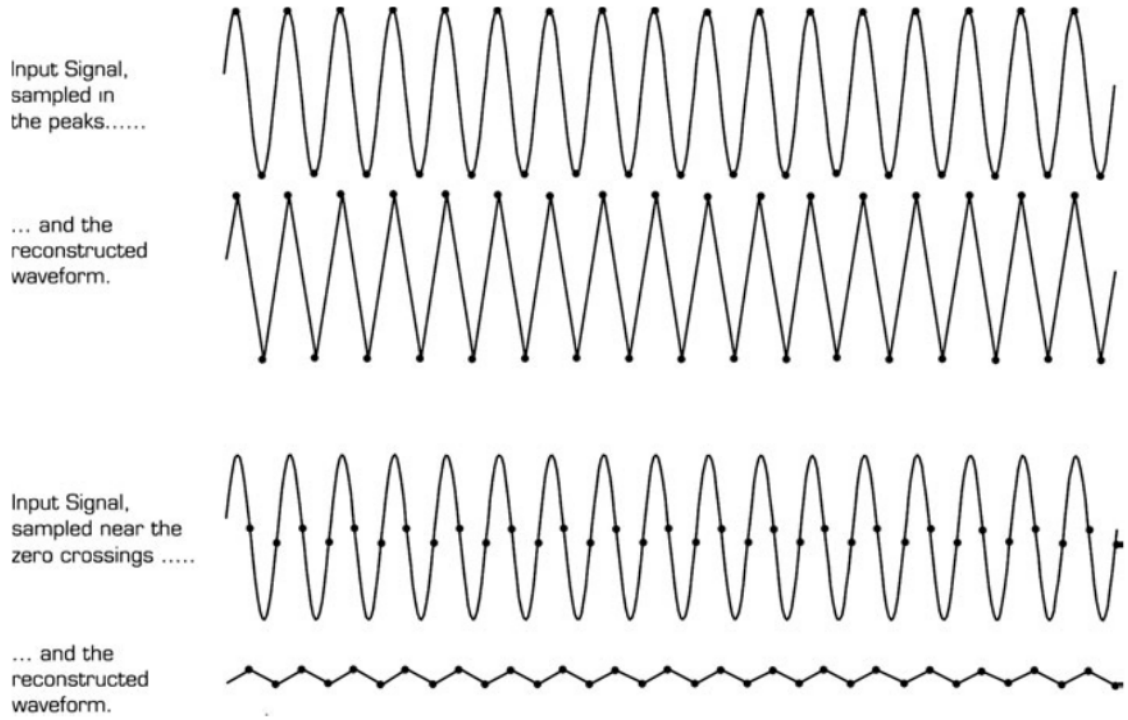


Figure 4.46 – Onde sinusoïdale échantillonnée à deux fois sa fréquence, près des crêtes et près des croisements zéro.

Mais cela est-il aussi simple ?

Supposons que les échantillons soient pris à des moments très rapprochés dans le temps avec la même horloge d'échantillonnage, mais pas nécessairement aux crêtes du signal ; toute information d'amplitude sera alors sérieusement fausse ou perdue. En fait, si les échantillons sont pris exactement aux croisements des zéros, aucun signal n'apparaîtra puisque les échantillons auront cette même valeur 0.

Les oscilloscopes sont conçus pour représenter justement la fréquence mais aussi reproduire précisément l'amplitude.

Comme le montre la *figure 4.47*, trois échantillons par cycle est le minimum nécessaire pour donner suffisamment de détails au signal.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

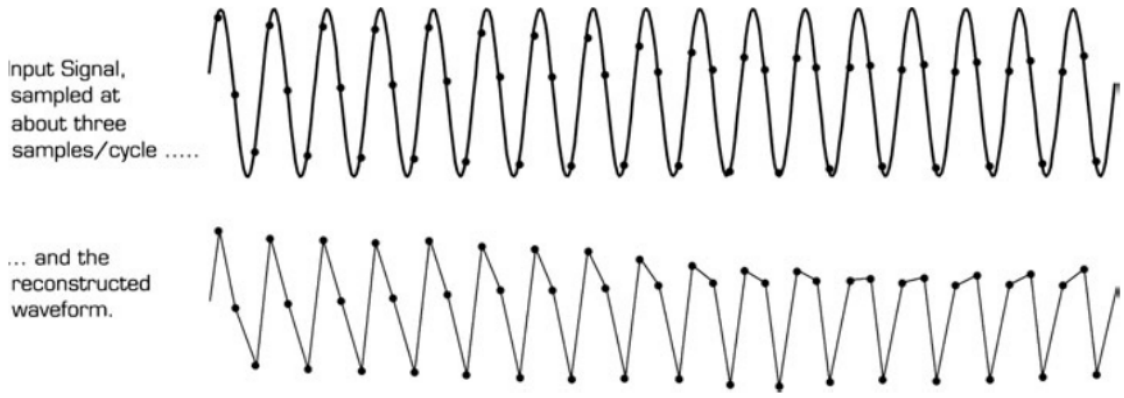


Figure 4.47 – Principe d'échantillonnage du théorème de Shannon.

Il faut retenir que l'on considère dix échantillons par cycle comme étant le minimum nécessaire pour donner suffisamment de détails au signal. Dans certains cas où l'on a besoin de moins de détail, cinq échantillons par cycles sont suffisants (*figure 4.48*).

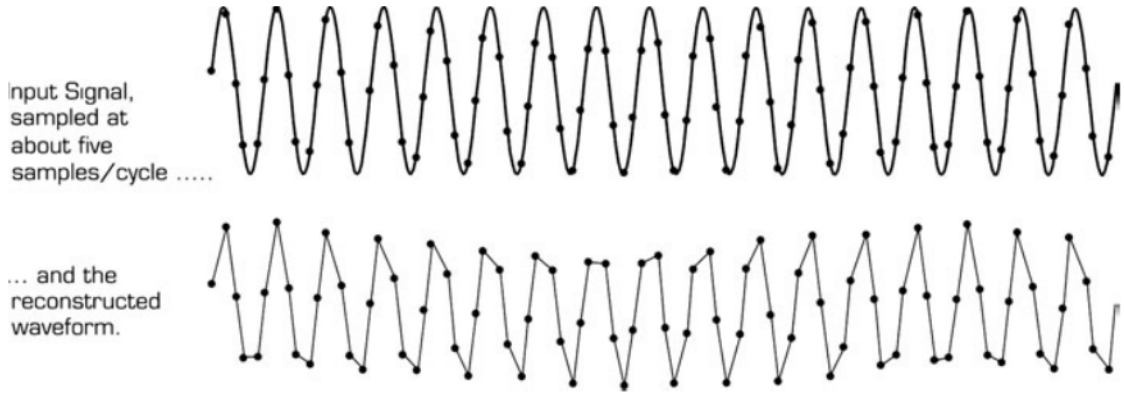


Figure 4.48 – Signal du dessus : fréquence d'échantillonnage à cinq échantillons par cycle.

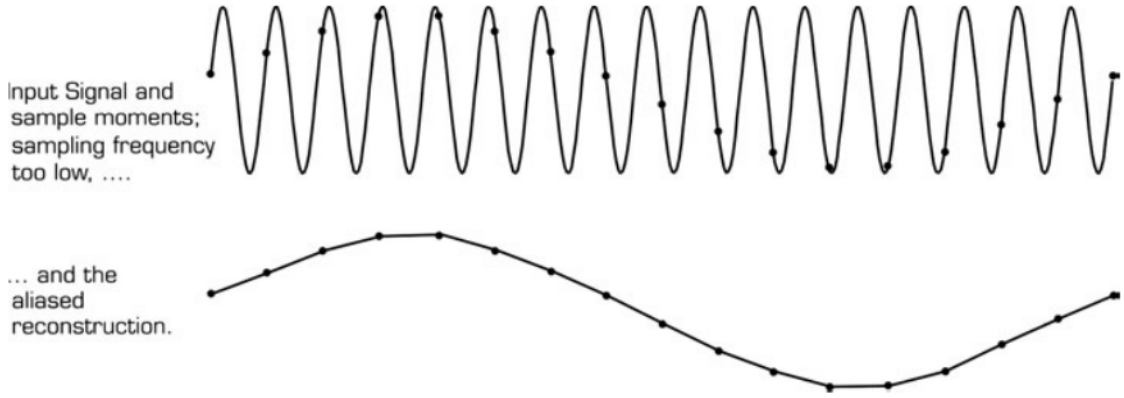


Figure 4.49 – Signal du dessous : repliement d'une onde sinusoïdale.

Pour un oscilloscope dont la fréquence d'échantillonnage maximum s'élève à 200 Méch/s, cela donne une fréquence maximale d'acquisition de 20 à 40 MHz. La fidélité d'affichage peut être améliorée à l'aide d'un système appelé « interpolation sinusoïdale » permettant de recomposer une sinusoïde à partir d'échantillons.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Repliement

Comme nous l'avons vu, il faut un nombre suffisant d'échantillons pour représenter un signal. Dans tous les cas, l'horloge d'échantillonnage doit être de cinq à dix fois plus élevée que la fréquence du signal.
Si elle est plus basse, alors la courbe recomposée ne sera pas fidèle au signal d'entrée.
Les *figures 4.48* et *4.49* montrent des échantillons pris à partir de cycles différents.
Cependant, il arrive que chaque nouvel échantillon soit acquis avec un intervalle de temps très légèrement plus long par rapport au croisement zéro. Si on affiche maintenant les échantillons et l'on reconstruit le signal correspondant, l'affichage montrera de nouveau une onde sinusoïdale de fréquence complètement différente mais d'amplitude exacte, c'est ce que l'on appelle un « signal fantôme ».
Les oscilloscopes les plus récents sont dotés d'un AUTOSET qui sélectionne automatiquement le facteur de déviation approprié et la base de temps dès que le signal d'entrée est présent à la BNC.
Cette configuration automatique évite le repliement.
Pour éviter le repliement (la fréquence du signal recomposé varie d'une configuration de la base de temps à une autre) on peut utiliser la détection crête pour déterminer l'amplitude réelle du signal à tout moment.
Il faut avouer que le repliement ne peut être présent sur un oscilloscope analogique !

Échantillonnage « temps réel et temps équivalent »

La numérisation décrite est appelée acquisition temps réel ou échantillonnage temps réel.
Tous les échantillons sont collectés dans un ordre donné, le même que celui dans lequel ils apparaissent à l'écran.
Seul un événement de déclenchement initialise une acquisition totale.
Pour beaucoup d'application, la résolution de temps disponible avec un échantillonnage temps réel n'est pas suffisante pour des signaux répétitifs.
Les oscilloscopes disposent d'un mode d'échantillonnage « échantillonnage temps équivalent » qui permet de recomposer un signal à partir d'un groupe d'échantillons prélevé à partir d'un événement de déclenchement (bien évidemment en faisant se succéder les événements de déclenchement et donc en accumulant les groupes d'échantillons).

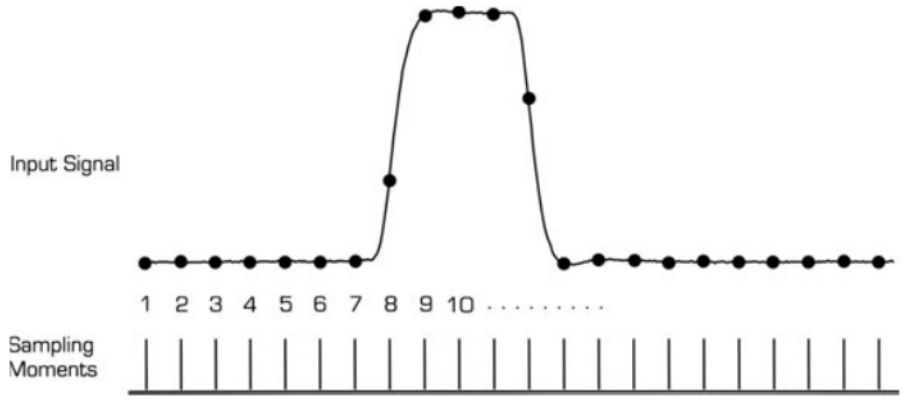


Figure 4.50 – Échantillonnage temps réel.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'échantillonnage temps équivalent donne une grande résolution de temps pour des valeurs de base de temps élevée. C'est comme si l'appareil avait une vitesse d'échantillonnage plus élevée que la véritable vitesse d'échantillonnage du numériseur.

Vitesse d'échantillonnage temps équivalent

L'échantillonnage temps équivalent augmente la résolution temporelle en reconstruisant un signal répétitif à partir de cycles différents.
Si l'on prend un exemple d'une base de temps de 5 ns/div affichant 50 échantillons par division, on déterminera la vitesse d'échantillonnage équivalente de la manière suivante :

$$\text{vitesse d'échantillonnage équivalente} = 50/5 \times 10^{-9} = 10 \text{ Géch/s}$$

soit 10 giga-échantillons par seconde

La vitesse d'échantillonnage temps équivalent permet d'indiquer indirectement la résolution horizontale pour des valeurs de base de temps élevées. À noter la différence entre la vitesse d'échantillonnage temps équivalente et temps réel.
Il existe deux techniques différentes pour l'échantillonnage temps équivalent :

– le séquentiel,
– l'aléatoire.

Échantillonnage séquentiel

Principe : les échantillons sont prélevés de la gauche de l'écran vers la droite. Chaque échantillon prélevé résulte d'un nouvel événement de déclenchement.
Pour remplir un enregistrement complet, il est nécessaire d'avoir autant d'événements de déclenchement que de position mémoire (*figure 4.51*).
Le premier échantillon prélevé après l'événement de déclenchement est mis en mémoire puis le deuxième sert à démarrer l'horloge qui occasionne un temps de retard connu t (inférieur à 50 ps) avant la mise en mémoire de celui-ci, puis le troisième qui après un retard de temps équivalent de $2t$ va être stocké et ainsi de suite.

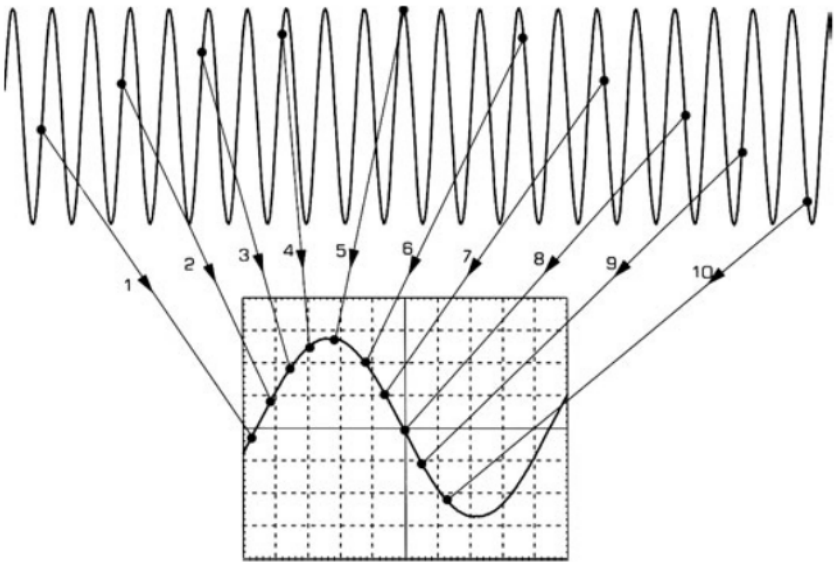


Figure 4.51 – Affichage d'échantillonnage séquentiel.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

À tout événement de déclenchement, un échantillon nouveau « n » est prélevé après un retard $(n-1)\cdot t$. il en résulte l'affichage, donné par les échantillons prélevés apparaissent en séquences fixes, se forment de la gauche vers la droite. Le nombre de cycle et d'événements de déclenchement est égal à la longueur d'enregistrement. Il permet donc le retard de post-déclenchement mais ne peut fournir les informations de pré-déclenchement. Il est cependant plus rapide que le mode aléatoire pour des bases de temps rapides.

Échantillonnage aléatoire

Un groupe d'échantillons est prélevé et stocké en continu au hasard indépendamment d'un événement de déclenchement.
Grâce à l'horloge d'échantillonnage, on connaît l'intervalle de temps fixe entre chaque prélèvement.
Ensuite, suivant l'ordre de prélèvement dans le temps, l'analyse du temps par l'horloge donnera l'ordre de placement des échantillons dans les cases vides de la mémoire, et c'est pourquoi pour des bases de temps rapides ce type d'échantillonnage est à proscrire car trop lent. Mais cette technique par contre permet le pré et le post-déclenchement.

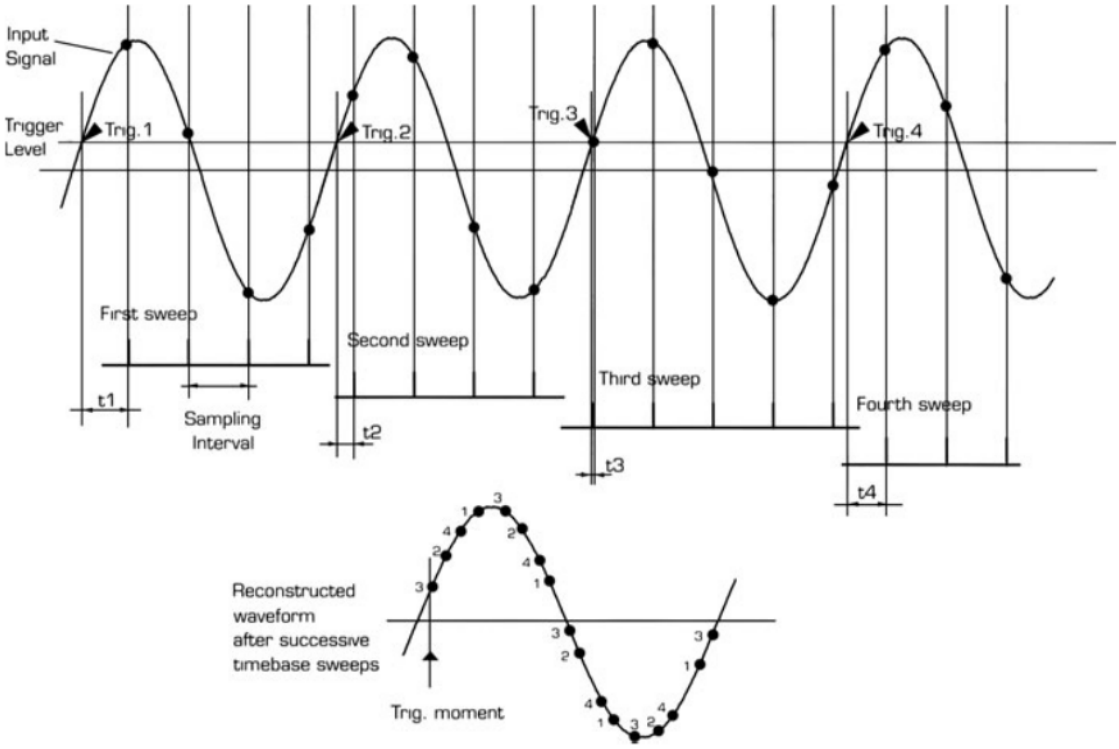


Figure 4.52 – Affichage d'une trace à l'aide de l'échantillonnage aléatoire.

Applications en mode monocoup

La principale différence avec l'oscilloscope analogique, le numérique peut, comme vu précédemment, stocker des informations de signaux.
Il est donc naturellement indiqué pour l'étude de phénomènes à vitesse de répétition lente, ou non répétitifs, appelés signaux monocoup.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

On les retrouve en électrotechnique dans les mesures de courant d'appel, de tests destructifs ou d'appareils de protection comme le test d'un disjoncteur C60N.

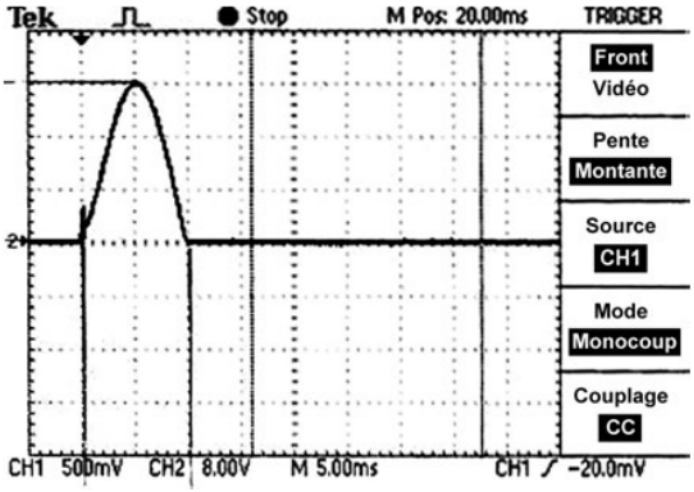


Figure 4.53 – Courant de démarrage moteur sur disjoncteur inapproprié.

Il est vrai que le mode monocoup existe en analogique, mais les numériques sont les seuls à faire une acquisition détaillée par un seul balayage.
Comme vu au niveau de l'analogique, l'appareil en simple déclenchement doit être armé au déclenchement (« ready » suivant les oscilloscopes…).

Types d'affichage, analyse totale par opposition à l'analyse vectorielle de l'image

Les oscilloscopes analogiques utilisent un tube cathodique où le procédé de déviation est électrostatique (une tension entre deux plaques fait dévier le faisceau) donc adapté à une gamme de fréquence élevée depuis le continu.
La déviation est la conjonction du signal d'entrée et de la base de temps qui guide le faisceau au point sur l'écran, ce mode est appelé vectoriel.
Par opposition, le numérique utilise un autre type de tube cathodique où le faisceau est dévié électromagnétiquement comme un téléviseur ou un écran de PC (des lignes parallèles sont tracées à fréquences fixes, et l'oscilloscope calcul les points qui ont besoin d'être mis en surbrillance, ensuite le faisceau est intensifié). Il visualise à l'écran non pas le signal direct d'entrée mais le signal reconstitué à partir de données acquises plus tôt. Ce type d'affichage est dit à analyse totale d'image.
Les oscilloscopes LCD actuels dotés d'un affichage à cristaux liquides nécessitent beaucoup moins de puissance que les tubes cathodiques et sont donc adaptés aux oscilloscopes portables ou de terrain.

■ Commandes et fonctions de l'oscilloscope numérique

Les caractéristiques d'un oscilloscope numérique tiennent aux commandes typiques que nous ne retrouvons pas sur un analogique et déjà évoquées au chapitre précédent. Nous allons en examiner les plus courantes.

□ Pré et post-déclenchement

Dans le cas d'un oscilloscope analogique, chaque balayage de la base de temps a été initialisé par un événement de déclenchement. Mais dans beaucoup d'applications,

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

l'information intéressante n'arrive pas forcément au moment où intervient l'événement de déclenchement stable qui est le signal à mesurer lui-même.
Or il faut avoir recours au mode de pré-déclenchement : la possibilité de déclencher sur un signal choisi tout en affichant le signal précédant ce moment de déclenchement.
Par exemple : si l'on étudie le signal de commande d'un semi-conducteur, trop petit pour faire déclencher un oscilloscope.
Ou si l'on souhaite détailler une partie d'un signal juste après un événement de déclenchement, pour déterminer l'importance d'une instabilité sur un signal carré, on utilise le retard de post-déclenchement.
L'oscilloscope va déclencher sur un front ; la base de temps est configurée à une vitesse élevée.
À l'événement de déclenchement une horloge à quartz va comptabiliser le temps écoulé, égal au temps de retard souhaité, l'acquisition va se faire sur le front choisi et l'on pourra mettre en évidence l'instabilité.

☐ Position de déclenchement

Les oscilloscopes qui présentent des possibilités de pré et post-déclenchement doivent posséder un moyen de contrôler leur position par une commande appelée « trigger position ».
Cette commande permet de placer sur l'écran le point de déclenchement (intersection de deux curseurs ou un nombre de valeurs préprogrammées seulement sur certains oscilloscopes).

☐ Capture de parasite

Un oscilloscope analogique ne peut capter que toute partie de signal répétitive et synchrone avec le signal principal. L'exemple de la *figure 4.54* montre un parasite transitoire. Avec un numérique, si la base de temps n'est pas adaptée, le problème

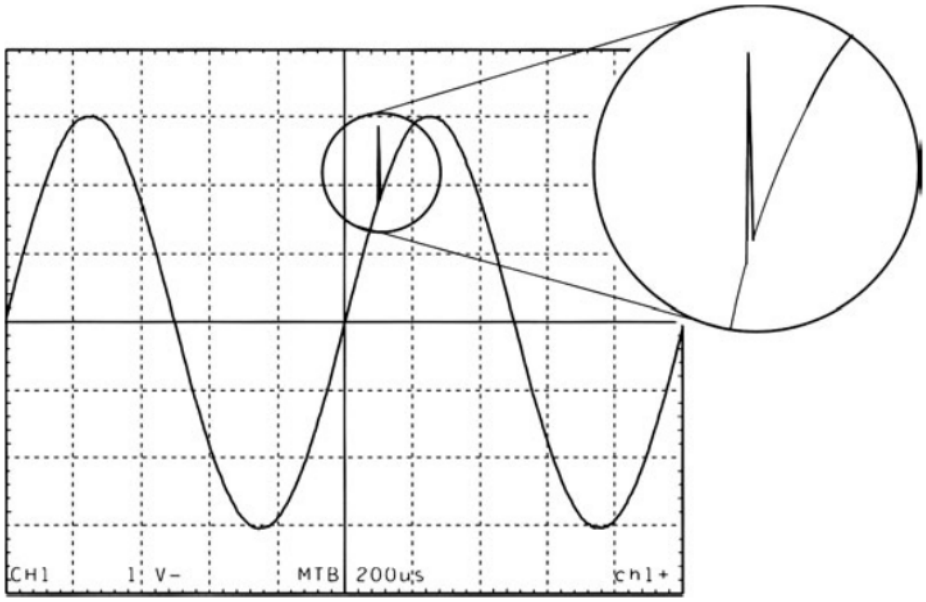


Figure 4.54 – Onde sinusoïdale avec parasite superposé.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

est récurrent mais une fonction « détection crête », peut en surveillant en continu l'amplitude du signal principal, détecter une valeur atypique.

Cela permet aussi de mettre en mémoire une déformation sur un signal caché par l'emploi d'une base de temps inadaptée (trop lente). Cette fonction peut aussi être utile en modulation d'amplitude ou la base de temps doit être calée sur la fréquence porteuse.

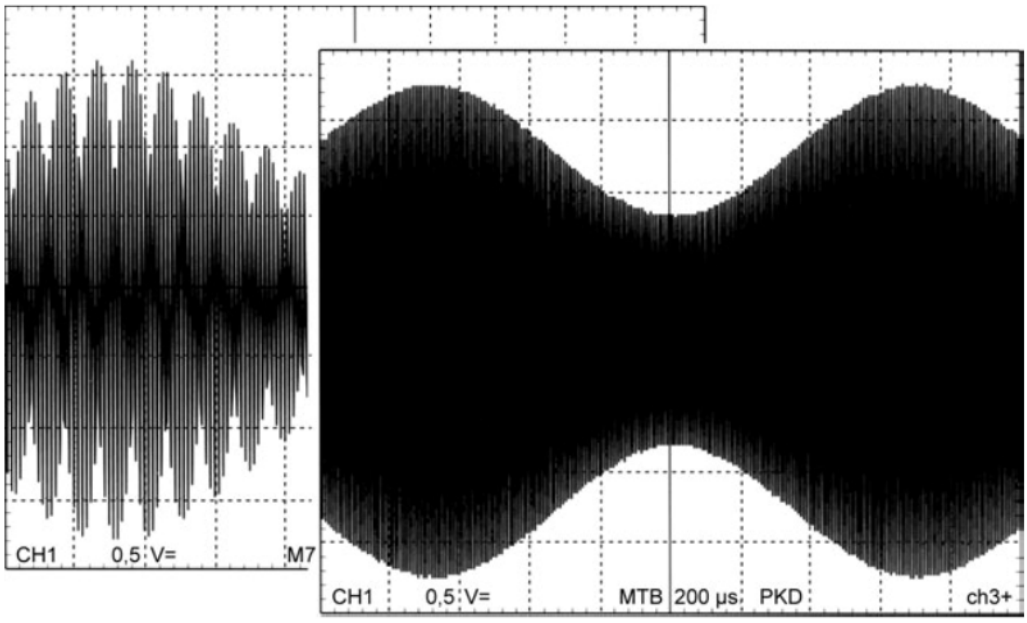


Figure 4.55 – Signal modulé en amplitude avec (à droite) et sans (à gauche) le mode détection crête.

☐ Mode Roll ou mode de rafraîchissement

L'oscilloscope démarre l'acquisition d'échantillons et les stocke dans la mémoire d'acquisition à partir un événement de déclenchement. Dès que la mémoire est remplie, le processus d'acquisition s'arrête pour permettre à l'appareil de recopier les données dans la mémoire d'affichage ; on peut faire un parallèle avec l'analogique qui lui n'affiche rien quand sa base de temps est relancée.

Ce mode Roll peut pour les applications basses fréquences notamment (qui prendraient des minutes au lieu de microsecondes) prélever les échantillons et les copier vers l'affichage.

Cependant, les échantillons arrivent par la droite et se recopient vers la gauche, ceci permet d'avoir un aperçu en continu dans le temps du dernier signal.

On peut utiliser l'oscilloscope comme un enregistreur papier, pour toutes les variations lentes :

- processus chimiques ;
- charge et décharges de batteries ;
- régulation de température…

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

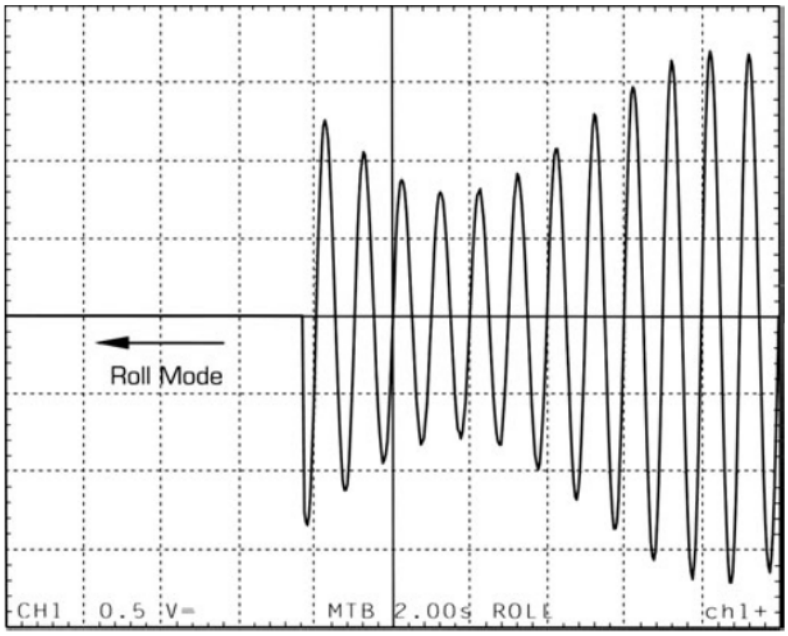


Figure 4.56 – Mode Roll.

☐ Agrandissement de l'affichage

Avec les analogiques, on peut agrandir de 10 fois la base de temps ; avec les numériques, le pas peut être plus petit, plus nombreux et sélectionner à volonté × 2, 4, 6, 8, 16.

De plus, cela peut être réalisé en horizontal et vertical par traitement une fois l'acquisition réalisée.

☐ Déclenchement spécial

Nous avons vu que le numérique était adapté à la capture de signaux transitoires par l'utilisation d'un moyen de déclenchement souple. Mais le déclenchement sur front peut nécessiter d'autres moyens que nous n'aborderons que succinctement car peu utilisés en électrotechnique.

– Déclenchement sur mot temporel logique (*pattern triggering*) : l'oscilloscope va déclencher sur mot (4 lignes) défini par l'utilisateur. les lignes sont configurables en état indifférencié, haut ou bas.
– Déclenchement sur mot d'état : l'oscilloscope déclenche si le mot appliqué aux entrées sur le front choisi (montant ou descendant) de l'horloge correspond à celui défini par l'utilisateur. le signal d'entrée est désormais considéré comme signal horloge.
– Déclenchement sur parasite : l'oscilloscope déclenche sur des impulsions de durée inférieure à la moitié d'un cycle de la fréquence la plus élevée autorisée.
– Déclenchement qualifié en temps : l'acquisition démarre si événement présent pour une durée de temps minimale, maximale, entre deux valeurs.
– Retard sur événement (*figure 4.57*) : l'acquisition démarre une fois le nombre d'événements choisi atteint.
– *n* cycles (*figure 4.58*) : pour ne faire apparaître que l'impulsion d'un signal ($n = 5$).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

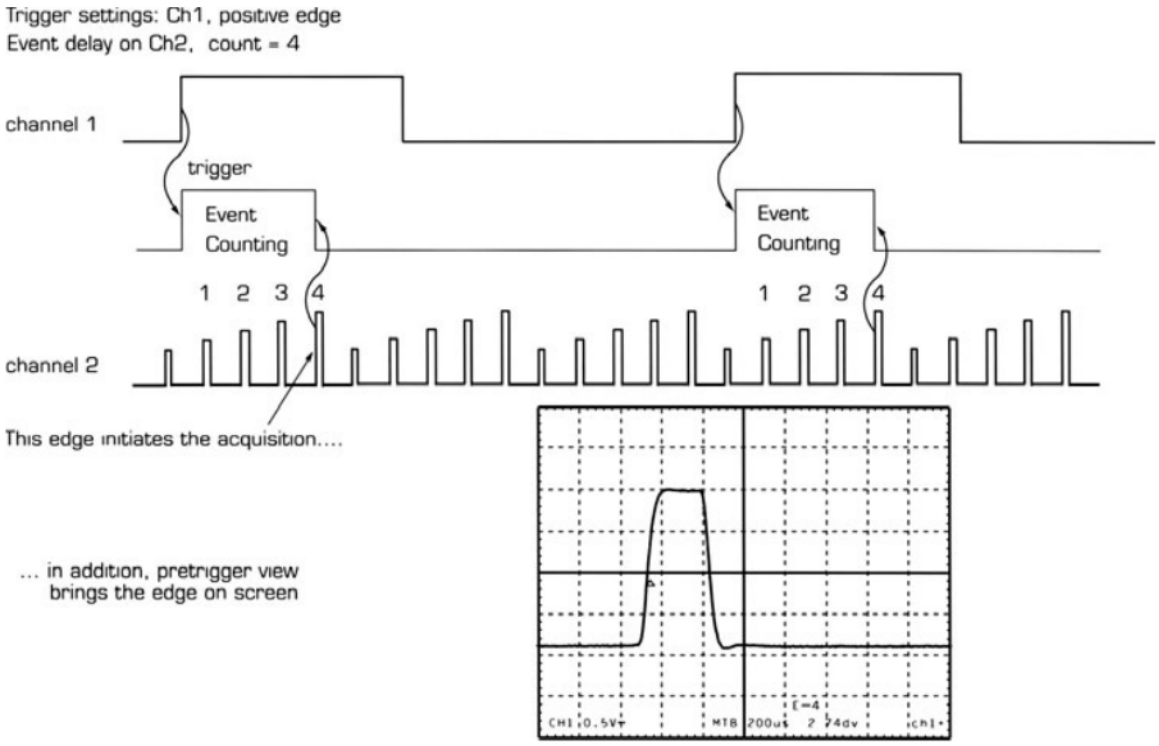


Figure 4.57 – Retard sur événement.

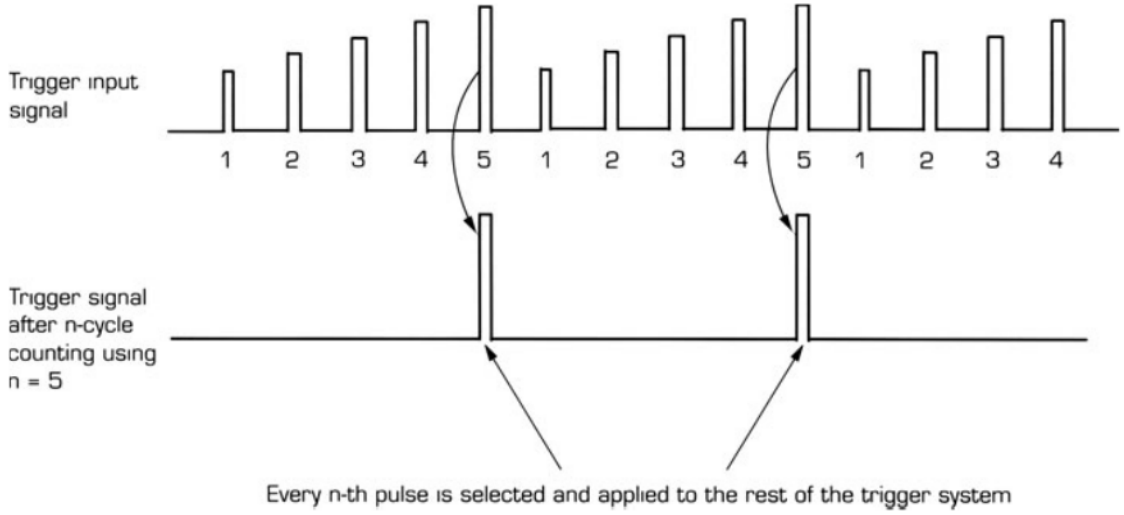


Figure 4.58 – Déclenchement sur *n* cycles (*n* = 5 dans ce cas).

☐ Stockage de la forme d'onde

Les oscilloscopes numériques sont dotés d'un certain nombre de mémoires tampon qui peuvent emmagasiner de 2 à 200 traces afin que celles-ci soient analysées ultérieurement à l'acquisition.

Sur le terrain, il est pratique de pouvoir stocker dans des mémoires d'enregistrement un maximum de traces sans tenir compte du nombre de voies de l'appareil ce qui permet de garder toutes les informations de temps utiles ensemble, contrairement aux mémoires de trace dans lesquelles est stockée individuellement chaque trace d'une acquisition multivoie.

Le transfert sur PC des relevés est aussi possible pour un traitement postérieur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Algorithme d'affichage, interpolation, jonction de points

Ce que nous voyons à l'écran d'un numérique est le signal reconstitué à partir d'un nombre suffisant d'échantillons situés dans la mémoire.

La plus courte façon de tracer une courbe entre deux points est la ligne droite : c'est l'interpolation linéaire, elle convient tant que le nombre d'échantillons est suffisant (points rapprochés : 50 par divisions).

Si un agrandissement est souhaité, la distance entre les points augmentant, la clarté du signal demandera une autre méthode, c'est là qu'intervient l'interpolation sinusoïdale, elle permet la reconstitution d'un signal sinusoïdal avec un minimum d'échantillons.

☐ Mode fenêtre

Il sert à réaliser la partition de l'écran en deux afin de comparer des signaux (optimisés en réduisant l'amplitude des signaux affichés).

■ Mesures automatiques et traitement

☐ Mesures

Le but premier des oscilloscopes est d'afficher des signaux et de mesurer les paramètres : valeur crête, valeur moyenne, valeur efficace, la fréquence, le rapport cyclique, le temps de montée, etc.

Figure 4.59 – Exemple de résultats de mesures données sur un Lecroy.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Avec un oscilloscope analogique, l'utilisateur doit effectuer manuellement le dimensionnement de tous les paramètres alors qu'un numérique en stockant toutes les données acquises peut calculer de façon fiable et précise toutes les valeurs des différents paramètres.

Mais il est important de comprendre que ces valeurs ne sont que les résultats basiques des valeurs stockées et un mauvais réglage de l'oscilloscope peut amener à obtenir des résultats tronqués.

☐ Traitement numérique

Les données du signal acquises par l'oscilloscope contiennent des informations à profusion.

Le mode X-Y

Permet à l'utilisateur de visualiser la phase ou deux signaux de fréquences concomitantes.

Exemple : utiliser pour vérifier les déphaseurs, les filtres, les vibrations sur des systèmes en mouvement à l'aide de capteurs de déplacement, le couple utile moteur en fonction de la vitesse…

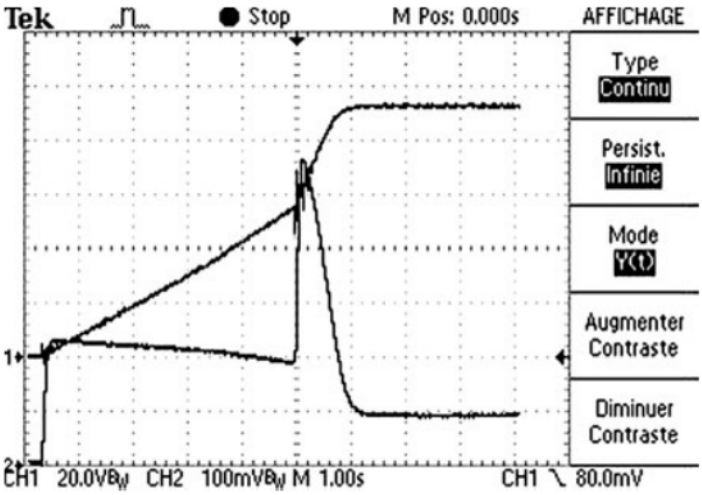


Figure 4.60 – Exemple d'application : courant moteur instantané *im* = *f*(*t*) et vitesse moteur *n* = *f*(*t*).

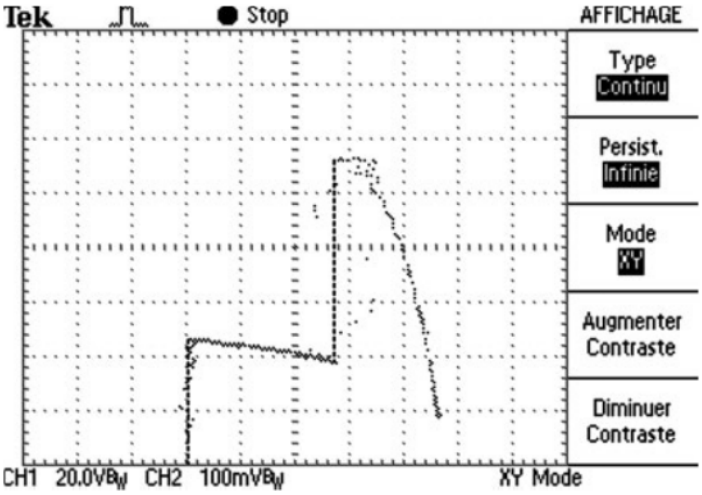


Figure 4.61 – Exemple d'application de la figure 4.60 converti en *i* = *f*(*n*) sur un moteur asynchrone démarrant en étoile-triangle à partir d'un TDS 220 Tektronix.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Avec un oscilloscope numérique, la bande passante d'acquisition est totale, tandis que pour un analogique, en mode X-Y, on ne peut utiliser qu'une gamme de fréquence limitée. Par contre le mode X-Y est en affichage continu et direct en analogique alors qu'il n'est que le résultat que d'un seul enregistrement en numérique.

Le calcul mathématique, multiplication, addition, soustraction… est présent dans les numériques grâce à un calculateur de signal numérique (DSP) supplémentaire, sinon ces traitements sont possibles par voie d'un logiciel qui permet de rapatrier tous les points et de les traiter ensuite par un autre logiciel compatible grand public.

Le moyennage augmente la résolution

Utilisé pour réduire le bruit superposé sur un signal par combinaisons successives, le moyennage permet d'augmenter la résolution (8 bits soit 256 niveaux de tension en axe vertical) en calculant la moyenne des acquisitions successives. Principe plus lent mais permettant à chaque doublement du nombre d'acquisition de rajouter un bit supplémentaire à la résolution.

☐ Mode enveloppe

L'oscilloscope reproduit l'affichage en enregistrant les minima et les maxima pour chaque position d'enregistrement sur des acquisitions successives. L'affichage montre l'effet cumulatif des changements d'amplitudes à long terme et permet la mesure des instabilités.

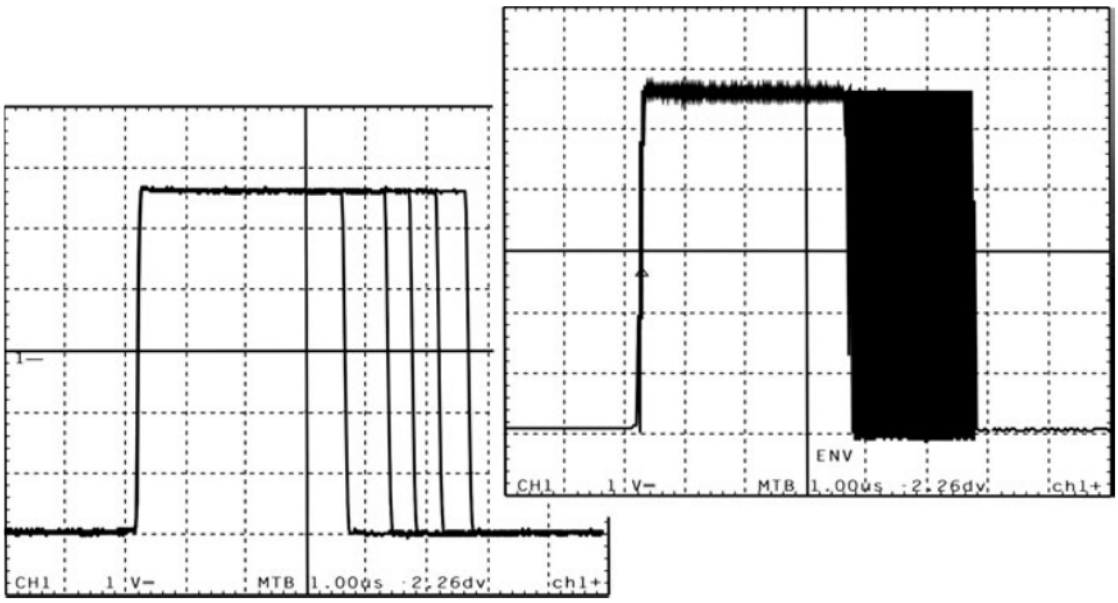


Figure 4.62 – Instabilité sur impulsions avec et sans le mode enveloppe.

Filtrage numérique

Le filtrage numérique n'est autre qu'un moyennage de chaque échantillon d'un enregistrement avec les échantillons adjacents de ce même enregistrement. Il en résulte une diminution du bruit du signal, mais également de la bande passante.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Comparaison d'une forme d'onde, test de gabarit

C'est la fonction : bon/mauvais, un signal standard, comprenant les limites est stocké dans l'un des registres : c'est le gabarit. L'oscilloscope réalise l'acquisition de signaux et vient automatiquement les comparer au gabarit défini pour ensuite afficher si le signal est bon ou mauvais.

☐ Transformée de Fourier rapide (FFT)

La transformée de Fourier rapide est une opération mathématique qui vise à extraire les fréquences individuelles (harmoniques, spectre) contenues dans chaque signal pour les afficher et donner leur amplitude propre.
La FFT est utile pour trouver la valeur de la distorsion d'un signal, identifier les fréquences contenues dans les signaux complexes pour pallier à la pollution harmonique par exemple.

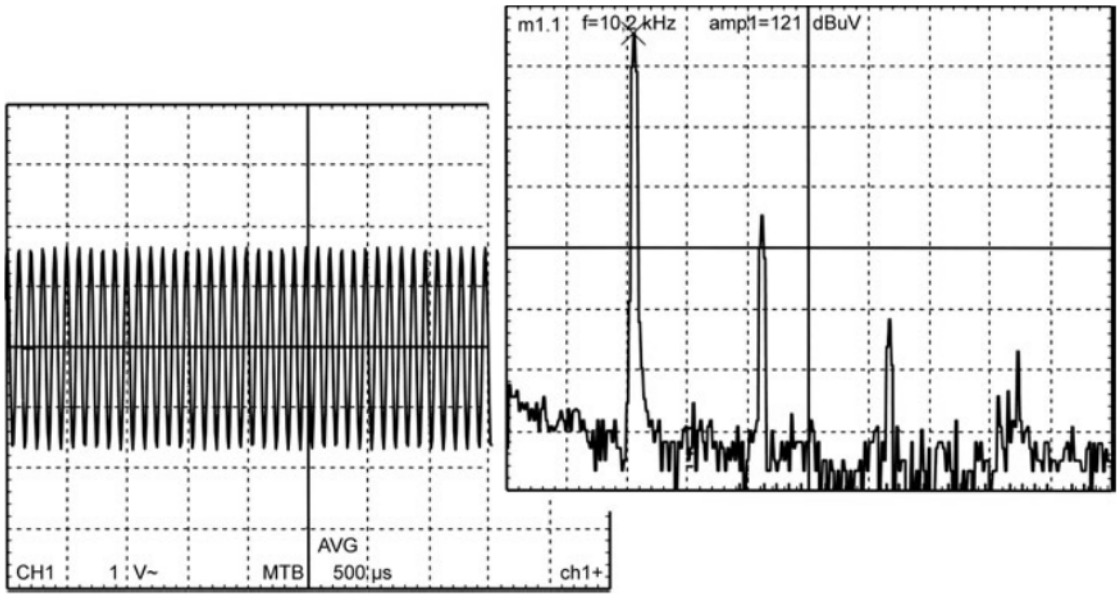


Figure 4.63 – Forme d'onde et sa transformée en fréquence (appelé aussi spectre harmonique).

☐ Multiplication, intégration : mesure de puissance, dissipation thermique

Une des applications parmi les plus courantes est de mesurer la puissance instantanée, en effectuant le produit du courant par la tension notamment sur des alimentations de puissance, des amplificateurs de puissance, des régulateurs de tension.
Une des possibilités de l'oscilloscope donnée par le produit des deux voies est de vérifier le dimensionnement d'un dissipateur thermique en analysant le produit du courant et de la tension dans les phases de commutation comme de conduction et d'en définir les énergies dissipées lors de ces deux phases de fonctionnement d'un semi-conducteur en intégrant la courbe de puissance instantanée pour donner le résultat en watts/seconde.
L'intégration peut être utilisée en mécanique pour déterminer la vitesse en fonction de la courbe de l'accélération donnée par des conditionneurs (délivrant une tension proportionnelle à l'accélération).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Différentiation

Elle montre la vitesse de changement d'un signal, le SLEW RATE (courbe différentiel d'un signal par rapport au temps).

☐ Affichage alphanumérique et mesure par curseur

Certains oscilloscopes affichent directement à l'écran les sensibilités d'entrée ainsi que les vitesses de balayage.
De plus, il est généralement possible de réaliser des mesures par l'intermédiaire de curseurs aussi bien en amplitude que dans l'axe temps.
Les valeurs étant affichées également à l'écran, ces possibilités offrent un confort d'utilisation évident pour l'utilisateur.
De plus dans le cas d'une édition sur imprimante, l'utilisateur sera en possession de l'ensemble des éléments pour procéder à une exploitation directement sur l'oscillogramme par les commandes du logiciel une fois l'acquisition faite.

■ Interfaçage

Dans de nombreuses situations, la communication entre l'oscilloscope et le PC semble un besoin de plus en plus courant : aussi bien pour transférer les données de l'oscilloscope au PC que pour contrôler l'oscilloscope par le PC ou même par PC via un logiciel de commande vocale ou Internet.
L'oscilloscope numérique est muni (souvent en option) d'un organe de communication associé à un logiciel. Les interfaces de communication les plus employés sont le port RS232 et le BUS GPIB, également appelé Bus IEEE-488 et maintenant le port USB 1 et 2.

☐ Le port RS232

C'est une interface série qui est maintenant remplacée sur les nouveaux PC par le port USB (entrée USB « 1 » ou « 2 »). Cette interface assure la communication par modem ainsi que la connexion de certains périphériques tels que souris ou imprimantes. D'autre part, les accessoires peuvent être multipliés grâce au HUB (imprimantes, appareils photos, webcams, disque dur, etc.).
De nombreux logiciels utilisent la communication grâce à ce type de liaison, puisque les modifications à apporter au PC sont minimes et le câblage simple. Il est donc commode de proposer un logiciel intégré à l'oscilloscope permettant de se servir d'un PC pour mémoriser et exploiter des signaux.

☐ Le GPIB (*General Purpose Interface Bus*)

C'est un bus parallèle conçu pour une utilisation avec les instruments de mesures. Inventé par Hewlett-Packard, ce système est basé sur la transmission série d'octets soit de 8 bits en parallèle, ce qui lui confère des taux de transfert de données élevés, jusqu'à 1 MB/s.
Il autorise la connexion d'un grand nombre d'instruments entre-deux, il permet aux instruments d'avertir le contrôleur à tout moment pendant le protocole, si une erreur de mesure est détectée par exemple.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Le PC contrôlant ce bus peut être un contrôleur ou une carte intégrée au PC. Le logiciel fourni crée aussi un univers de test complet intégrant une série d'instruments dans un seul système de test.

☐ Le port USB 1 et 2

Il s'agit d'un port série devenant maintenant le port de liaison universel. Il présente l'avantage de permettre des raccordements et déconnections de tous types de matériels à chaud, ce qui n'est pas le cas des ports série et parallèles et d'autre part, les nouveaux PC ne sont plus équipés de ces deux derniers types de ports. Il est aussi à noter que ce type de port, sous Windows XP, reconnaît automatiquement tout matériel qui lui est raccordé évitant ainsi les problèmes de recherche de drivers.

La plupart des oscilloscopes numériques peuvent faire des recopies d'écrans à l'aide d'une imprimante, certains peuvent piloter un enregistreur papier. Si l'on ne dispose pas de matériel annexe, certains oscilloscopes plutôt haut de gamme possède des lecteurs intégrés où l'on peut enregistrer les fichiers de différents signaux mesurés sous différents formats compatibles avec les logiciels grand public de traitement de texte, tableur, retouche photo et dessin…

Les nouveaux oscilloscopes numériques peuvent être maintenant directement branchés et interconnectés par réseau LAN (RJ 45) sous Ethernet.

Ils peuvent être commandés à distance par Internet et certains sont aussi serveur HTML. Le GPIB est alors appelé à disparaître.

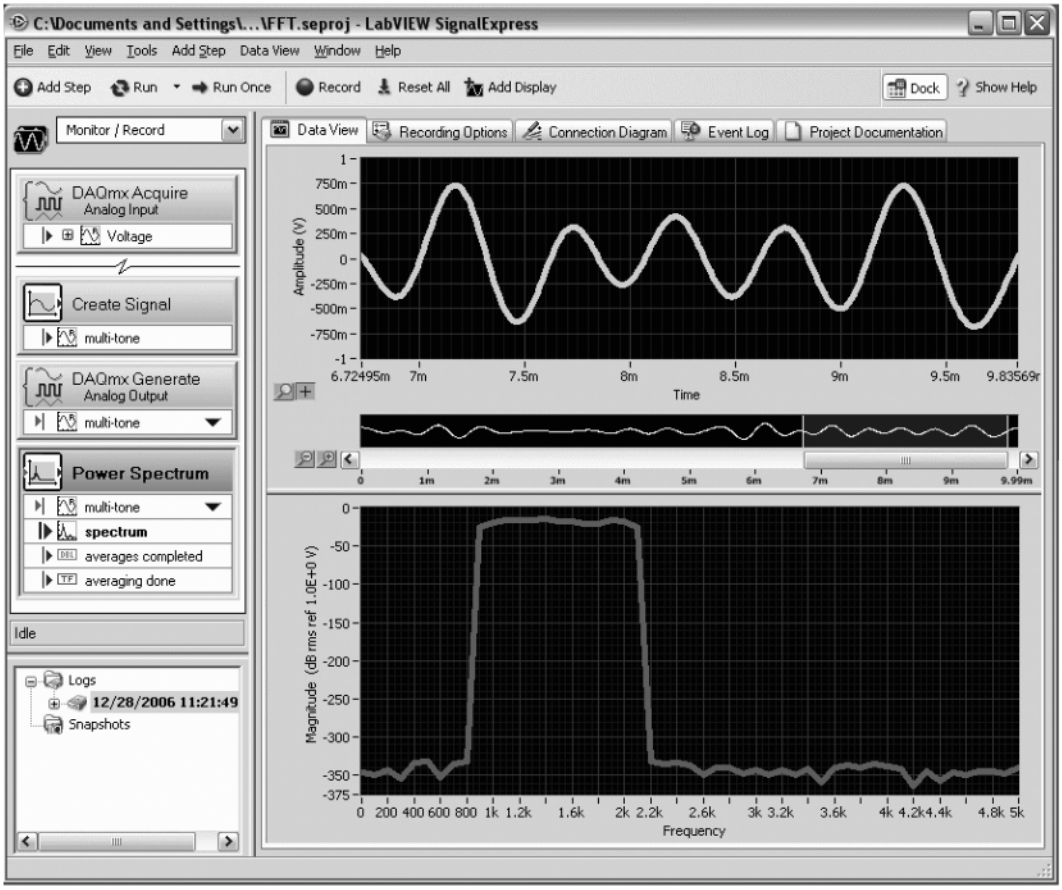


Figure 4.64 – Logiciel SignalExpress de Tektronix développé par National Instruments.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Après un grand nombre de rappels théoriques quand aux diverses fonctions d'un oscilloscope numérique associées à celles déjà revues sur un analogique, nous avons les connaissances nécessaires pour réaliser correctement le choix de l'oscilloscope le plus proche de l'application souhaitée.

■ Critères de choix d'un oscilloscope numérique

□ Lors du choix du matériel

Examiner les spécifications de fréquence d'échantillonnage, de résolution et de capacité mémoire.
S'assurer que l'oscilloscope permet le type d'échantillonnage en temps équivalent pour les signaux de fréquence élevée.
Examiner les possibilités de mode de fonctionnement et type de visualisation.
Évaluer la simplicité d'utilisation du matériel (ergonomie, automatismes…).
Comparer les services, supports techniques proposés par les différentes sociétés, durée de garantie, délai d'intervention, compétence, implantation géographique, etc.

□ Lors de l'utilisation

En classe 1, brancher l'oscilloscope sur une prise 2P+T avec mise à la terre.
Les raccordements doivent tenir compte de la catégorie de surtension (ou d'installation).
Calibrer la sonde.

4.4.4 Analogique ou numérique, ou les deux à la fois ?

L'oscilloscopie numérique est un domaine en pleine effervescence, en quatre ans, d'innombrables modèles ont fait leur apparition avec une constante : supplanter l'oscilloscope analogique, en intégrant à présent les avantages des deux technologies : visualisation d'événements antérieurs au déclenchement, obtention sur l'écran de traces qui ne se dégradent pas dans le temps et dont la qualité est indépendante de la récurrence du signal, qu'il soit en monocoup, les possibilités de traitement innombrables, les passerelles vers des PC qui seront de plus en plus intégrés… et surtout, le prix, qui en entrée de gamme est du même ordre de grandeur qu'un analogique (2 voies à 100 MHz).
Des irréductibles dans le domaine du dépannage vidéo, télévision persistent à utiliser des appareils analogiques et certains constructeurs proposent des appareils mixtes (Fluke, Metrix, Hameg, Lecroy, Agilent).

■ Les derniers développements et tendances du marché

□ Caractéristiques de l'analogique reprises par les nouveaux numériques

Nous avons vu que par son architecture, le numérique devait mettre du temps (relatif) pour lire le contenu de sa mémoire et restituer les données à l'écran alors que l'analogique temps réel offrait le confort de voir les courbes évoluer et réagir très rapidement aux changements de réglages.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Les constructeurs ont donc privilégié l'accroissement de la **cadence d'affichage** grâce à l'incorporation de processeurs dédiés à l'acquisition, au traitement et à la visualisation et à l'interface homme-machine.

Certains constructeurs arrivent à obtenir des vitesses de l'ordre du millier de trace par seconde (Agilent Technologies™), loin de l'analogique mais imperceptible à l'œil de l'utilisateur.

Attention ses chiffres relatent de conditions favorables car il faut donner le taux de rafraîchissement suivant la taille de la mémoire d'acquisition lorsque l'on dépasse la résolution horizontale de l'écran.

Le Japonais Yokogawa donne ces DL7X00 à 30 écrans/s pour 1 Mpoint/voie, le temps de réponse est de l'ordre de l'instantané mais les quelques milliers de secondes utilisés à la lecture du contenu mémoire et à l'affichage peuvent manquer à l'acquisition. Tektronix a développé le procédé Insta Vu en 1994 qui consiste à accumuler en mémoire des acquisitions de 500 points mises en trame et afficher ensuite avec un codage de couleurs ou en niveaux de gris fonction de la récurrence.

La vitesse d'affichage atteinte est de l'ordre de l'analogique (400 000 courbes/s).

Ce procédé a été repris deux ans après par Lecroy avec le procédé « persistance analogique » mais avec un rendement moins important. Puis Gould lancera le « Tru Trace » présent sur tous ses modèles actuels,

Ceci amorçait la reprise d'un des avantages indéniable de l'analogique : le **mode d'affichage en « trois dimensions »** :

Sur un oscilloscope analogique, l'intensité lumineuse constitue un troisième axe de visualisation. Ses variations fournissent des indications sur les taux de modulation ou la distribution temporelle de gigue des signaux.

C'est encore Tektronix qui en 1998 a sorti la gamme complète des TDS3000 et 7000 équipé d'Insta Vu intégrant à présent la nouvelle technologie au phosphore (appelée DPO : *Digital Phosphor Oscilloscope*) qui vise à reproduire le comportement du phosphore des écrans analogiques.

La nouvelle plate-forme d'oscilloscope de Tektronix, l'oscilloscope à phosphore numérique (DPO), combine le meilleur des deux camps, analogique et numérique, et va au-delà de ces techniques. Avec un seul instrument, vous pouvez désormais capturer toutes les informations intéressantes d'un signal : amplitude, fréquence et l'axe d'intensité qui révèle la répartition d'amplitude dans le temps.

L'oscilloscope à phosphore numérique représente une avancée décisive dans le monde de la mesure. Il offre tous les avantages classiques des DSO, de la mémorisation des données aux déclenchements sophistiqués. Il possède aussi les caractéristiques de type analogique comme l'affichage en échelle de gris et les performances du temps réel en utilisant le procédé chimique de la phosphorescence qui permet un affichage à modulation de l'intensité comme sur les écrans des oscilloscopes analogiques classiques.

Il fait ainsi de l'oscilloscope numérique un instrument d'acquisition universel.

Tektronix tire avantage de son expérience unique dans le domaine des DSO, notamment avec le temps réel numérique et l'acquisition InstaVu™, pour innover avec les performances remarquables du DPO. La *figure 4.65* montre l'organigramme simplifié d'un système DPO.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

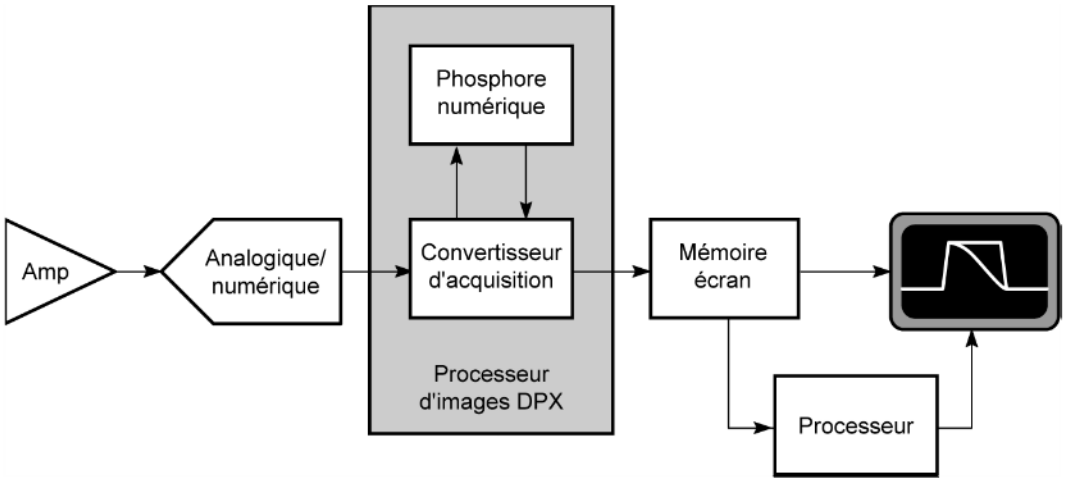


Figure 4.65 – Organigramme simplifié du système DPO.

Les capacités du nouvel oscilloscope à phosphore numérique (DPO) Tektronix surpassent celles des oscilloscopes analogiques et numériques grâce à une technique d'acquisition d'une puissance sans précédent. L'outil de mesure ainsi obtenu est supérieur à la somme de ses composants, car il permet de visualiser des informations encore jamais vues sur le comportement des signaux. Aucune architecture d'oscilloscope existante ne peut se mesurer à l'oscilloscope à phosphore numérique.

☐ Autres développements sur les numériques

La capacité d'acquisition

Cette caractéristique reste la première des préoccupations des constructeurs qui à présent avec le développement des systèmes numériques des télécoms et informatique ont été obligés d'élargir la **bande passante de leur étage d'entrée** de 500 MHz à 4 GHz utilisant la technologie germanium-silicium pour composer les étages d'entrées et les convertisseurs CAN.

Ainsi la **fréquence d'échantillonnage** plusieurs fois supérieure à la bande passante ne cesse d'être accrue passant à 10 Géch/s (Tektronix TDS694C) sur chacune de ses voies, 16 Géch/s pour le WAWEPRO 960 de Lecroy et 20 Géch/s pour le TDS7404 de Tektronix mais sur une seule de leurs voies.

Pour conserver une fenêtre d'acquisition suffisamment grande, la **taille des mémoires** doit être revue à la hausse parallèlement à la vitesse d'échantillonnage : 16 Mo/voie chez Tektronix et 64 Mo sur une seule voie chez Lecroy.

☐ Intégration du PC de plus en plus pressante pour les hauts de gamme

Même si les constructeurs ont laissé en face avant de l'oscilloscope numérique les commutateurs rotatifs correspondants aux commandes de base assez voisins des analogiques (pour éviter de déstabiliser la clientèle), certains sont passés à l'interface graphique sous Windows pour la commande de traitements, des déclenchements et autres ressources plus élaborées.

Agilent Technologies avec son Infiniium (*figure 4.66a*) et son interface couleur intuitive, Tektronix avec son TDS7000 et ses touches sensitives, Metrix avec sa nouvelle série OX7000 et son interface Windows Like, Gould sur sa plate-forme ultima (PC intégré, clavier, souris) et Lecroy avec son WAVEPILOT.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tout cela montre que l'on dirige l'oscilloscope vers une station de travail. L'incorporation d'un PC (différent de l'incorporation d'une carte d'acquisition dans un PC, traitée au § 4.5) offre un avantage en terme d'interface homme-machine mais aussi pour le stockage (disque dur, disquette, CD-Rom, carte PCMCIA…), l'interfaçage avec le port USB (connexion de modem ou modem intégré, d'imprimante…) et Ethernet pour les échanges rapides entre PC. Cette station par modem et Internet peut être pilotée, interrogée… peut servir à contacter des fournisseurs, consulter des fiches techniques, etc.

☐ Miniaturisation des oscilloscopes pour des applications sur sites

Les applications notamment en électrotechnique sur sites ont poussé les constructeurs à offrir des appareils portables autonomes appelés aussi oscilloscopes de terrain (autonomie de 2 à 4 heures, de masse inférieure à 2 kg, aux dimensions ergonomiques mais surtout aux caractéristiques dignes d'un oscilloscope de laboratoire moyenne gamme).
Ils conjuguent souvent multimètre, oscilloscope, analyseur de puissance et d'harmonique et « enregistreur sans papier » (pour certains modèles).
Leurs entrées sont différentielles, c'est-à-dire « flottante » s'affranchissant ainsi du mode commun, pour plus de sécurité (1 000 V cat. II et 600 V cat. III) et de commodité dans les mesures.
À retenir les trois constructeurs : Fluke, Tektronix et Metrix (*figure 4.66b à 4.68*).

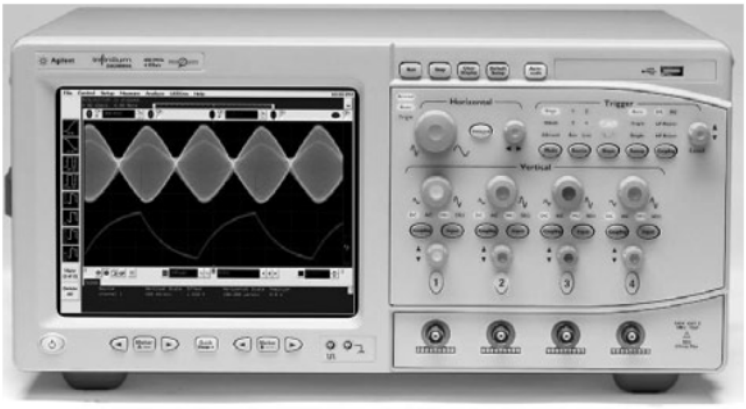


Figure 4.66 – (a) Oscilloscope Infiniium d'Agilent avec son port UBS.

Figure 4.66 – (b) Fluke et son ScopeMeter série 190 et 123.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 4.67 – Tektronix et les modèles de la série THS700.

Figure 4.68 – Metrix et la famille OX 7000.

☐ Oscilloscope de terrain avec liaison Ethernet

Il existe à présent des oscilloscopes numériques portables utilisables pour la maintenance électrotechnique industrielle de 40 MHz à 60 MHz et 100 MHz pour la maintenance de type électronique (*figure 4.69*). Un de la gamme possède jusqu'à 4 voies isolées 600 V catégorie III.

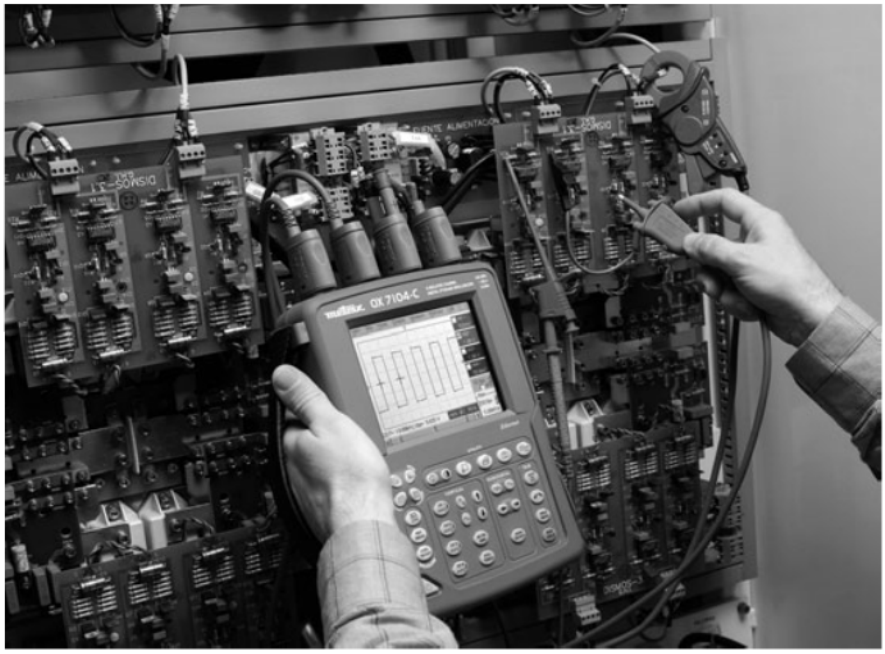


Figure 4.69 – Oscilloscope portatif utilisé pour la maintenance industrielle.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Leur particularité en plus de réunir cinq appareils en un (oscilloscope, multimètre, analyseur FFT, analyseur d'harmoniques et enregistreur) est d'avoir une communication « tout-terrain » de ces appareils.
En effet ils possèdent une interface Ethernet (10 Mb isolés) avec un serveur Web permettant de prendre la main sur l'instrument à distance, de transférer les courbes, les mesures ou des impressions d'écrans, sans logiciel supplémentaire, grâce à sa seule adresse Ethernet.
La connexion standard RS232 ou USB reste de mise pour tout raccordement à un PC.

Des sondes et adaptateurs intelligents

Le système Probix est l'assurance d'une mise en œuvre de l'instrument, non seulement rapide, mais surtout sans risque d'erreurs, ce qui est primordial pour des appareils utilisés dans le cadre de dépannages. Pour une compatibilité sans faille, la connexion de BNC et de cordons standard est toujours possible via les adaptateurs de sécurité fournis (*figure 4.70*).

Figure 4.70 – Sondes et adaptateurs pour oscilloscope Scopix.

Une collerette plastique interchangeable permet d'adapter la couleur de l'accessoire à la couleur de sa voie. L'alimentation tout comme l'étalonnage des capteurs s'effectue directement via l'oscilloscope. Certains accessoires comportent même trois boutons de commande directement accessibles sur la sonde.

4.4.5 Sécurisation des appareils

La publication CEI 664-1 de 1992 ordonne à l'utilisateur de choisir un appareil avec une catégorie de surtension suffisante en fonction du risque pouvant être rencontré suivant le niveau de tension d'alimentation et les surtensions transitoires susceptibles de survenir.
Parallèlement les classes d'isolement définissent le comportement du dispositif en cas de défaut. Au nombre de trois elles garantissent la sécurité de l'utilisateur en cas de panne, de court-circuit.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'oscilloscope est un outil de visualisation par excellence et peut être amené à être utilisé sur le réseau triphasé.
Cet appareil est de catégorie I ou II de surtension et de classe d'isolement 1, que se passe-il alors ?
Sans sonde différentielle connectée à l'entrée des voies ce montage cette mesure est impossible et le fait de couper la liaison à la terre est formellement interdit pour des raisons évidentes.
C'est alors que l'on peut utiliser des sondes différentielles avec les inconvénients suivants :

– aspect financier de l'achat de la sonde double voie ou des sondes ;
– bande passante limitée par rapport à celle de l'oscilloscope ;
– nombre de calibres réduits ;
– les incertitudes, les niveaux de bruit et les déphasages s'ajoutent avec ceux de l'oscilloscope ;
– il faut une alimentation (piles ou secteur) supplémentaire ;
– la lecture des valeurs sur le graticule doit tenir compte du calibre de la sonde, et la lecture n'est donc pas directe ;
– la sécurité est de classe 2 et repose sur la sonde uniquement.

Conclusion : le fait de disposer d'entrées différentielles acceptant d'importants niveaux de tension ouvre de nouveaux horizons à l'utilisation de l'oscilloscope en mesure flottante (*figure 4.71*).

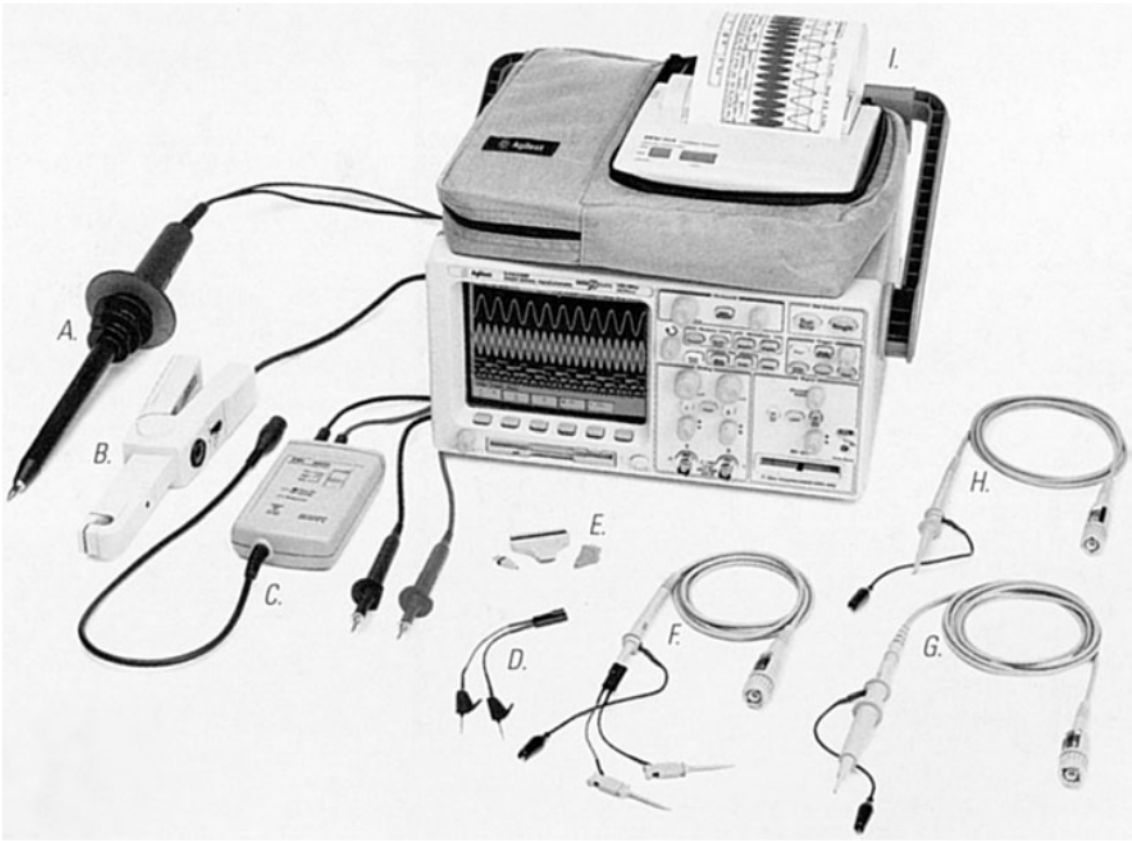


Figure 4.71 – Oscilloscopes de moyenne et haute gamme munis d'entrées différentielles (Agilent).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

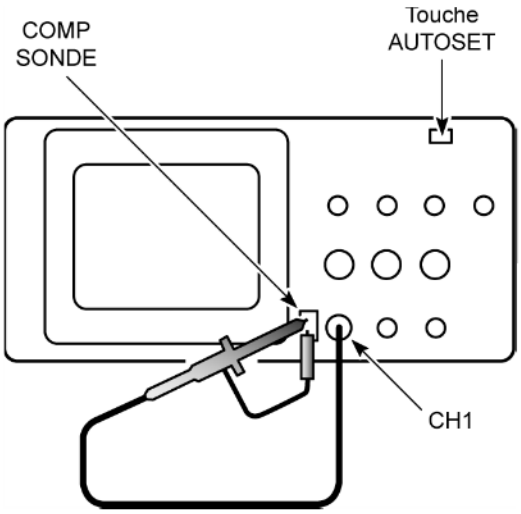


Figure 4.72 – Connexion de la sonde à la voie de l'oscilloscope ainsi qu'au générateur de signal rectangulaire.

Les entrées différentielles permettent de se relier sans référence de masse, la séparation totale des circuits de mesure évite les courants de circulation de masse, assure une protection avec mode commun > 500 V, grande dynamique de sensibilité 10 mV à 200 V/div, la bande passante de l'oscilloscope est préservée, etc.

4.4.6 Accessoires et logiciel

■ Sonde de tension passive pour oscilloscope

Composée essentiellement de composants passifs (résistances et capacités) en vue d'atténuer le signal à mesurer.

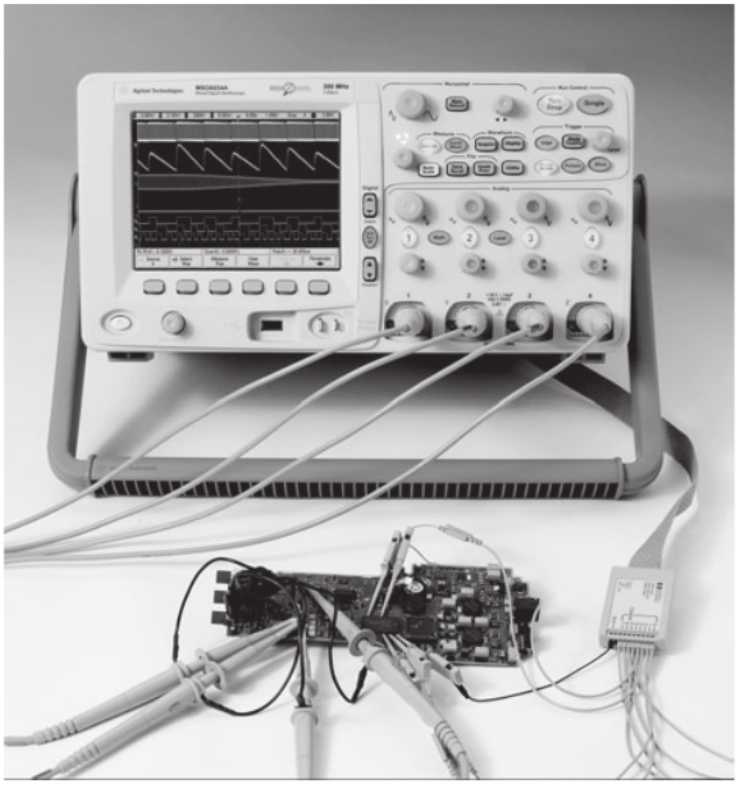


Figure 4.73 – Oscilloscope Agilent 6034 A et ses sondes passives de tension.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ **Comment fonctionnent les sondes passives et quelles sont leurs influences sur la mesure ?**

Blindage

La sonde est blindée pour limiter l'influence des interférences appelées bruit sur le signal mesuré mais aussi sur la réinjection des perturbations sur le circuit testé.
Ce câble blindé est connecté à l'oscilloscope par le connecteur BNC et le fil de terre au bout de la sonde vers le circuit testé assurant un blindage efficace.

Bande passante

La bande passante de la sonde est en général assez limitée, le fait d'associer celle-ci à un l'oscilloscope va abaisser la bande passante globale car la capacité d'entrée de l'oscilloscope et la capacité de la sonde s'ajoutent.
On va voir aussi que le temps de montée va aussi être affecté :
Dans le cas où la sonde et l'oscilloscope ont une BP de 100 MHz et chacun un temps de montée de 3,5 ns, le temps effectif global sera de :

$$Tm = \sqrt{tm^2_{\text{oscilloscope}} + tm^2_{\text{signal}}} = 4{,}95 \text{ ns}$$

avec un temps de montée de 4,35 ns, la bande passante de l'ensemble est de 350/4,35 = 70,7 MHz.
Certains oscilloscopes sont fournis avec des sondes garantissant une bande passante globale égale à celle de l'oscilloscope en ayant une BP supérieure à celui-ci.

Effet de charge

Chaque sonde possède une impédance d'entrée constituée par ses composants passifs (résistifs, inductifs, capacitifs).

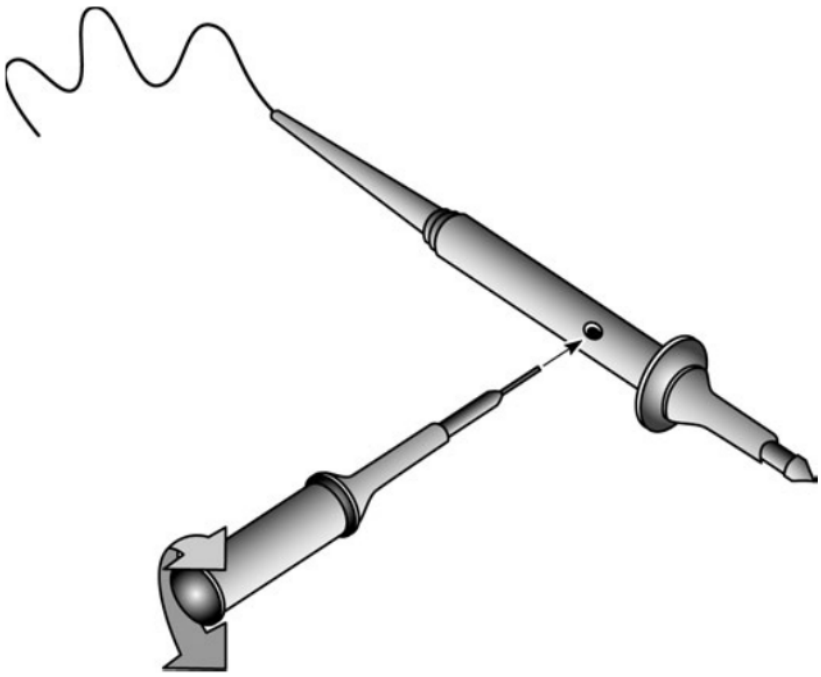


Figure 4.74 – Potentiomètre de compensation.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

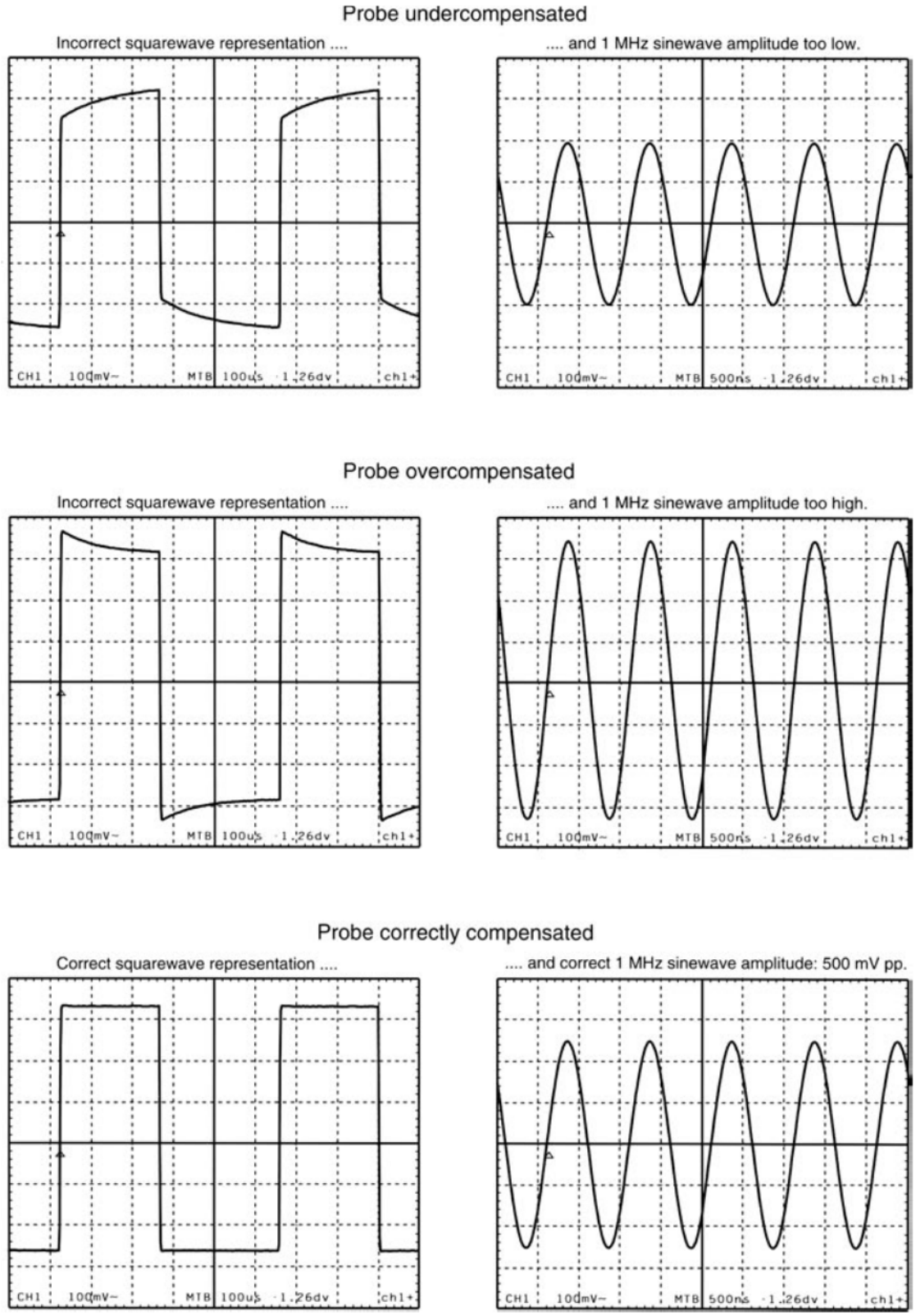


Figure 4.75 – Ces schémas indiquent l'effet pervers de la sous-compensation et de la surcompensation. Les relevés du bas indiquent une bonne compensation de la sonde.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Il faut tenir compte de ses caractéristiques lorsque l'on attend des résultats de mesure, tout comme des impédances de circuit test.
On sait qu'un signal rectangulaire contient un nombre important de fréquence, et quand le signal carré est fidèlement reproduit à l'écran alors la sonde est correctement compensée.

Tension maximum d'entrée

Bien s'assurer de la valeur de la tension d'entrée et choisir une atténuation de sonde adéquate, une sonde 100:1 est parfois recommandée.

Lecture de sonde

Attention certaines sondes ne sont pas forcément détectées par l'oscilloscope, et l'utilisateur doit remettre à l'échelle tous les signaux et mesures pour compenser l'atténuation de la sonde.
Pour celles détectées, l'oscilloscope se chargera de compenser l'indication de déviation verticale et toutes mesures d'amplitude pour éviter toute confusion.
Dans le cas contraire, enclencher la sonde × 10, × 100 de l'oscilloscope pour obtenir une adaptation des calibres de l'oscilloscope et donc une lecture directe sur les relevés.

Inductance de fil de masse

Il faut essayer d'avoir un fil de masse aussi court que possible pour des problèmes de résonance, en effet l'inductance du fil associée à la capacité formera un circuit amorti par la résistance, et accordé à une certaine fréquence ralentira le temps de montée, comme le montre la *figure 4.76*.
La plupart des oscilloscopes sont raccordés à la terre par le cordon secteur pour des raisons de sécurité évidentes. Le signal testé doit être au même potentiel de référence mais ce n'est pas le cas nécessairement.

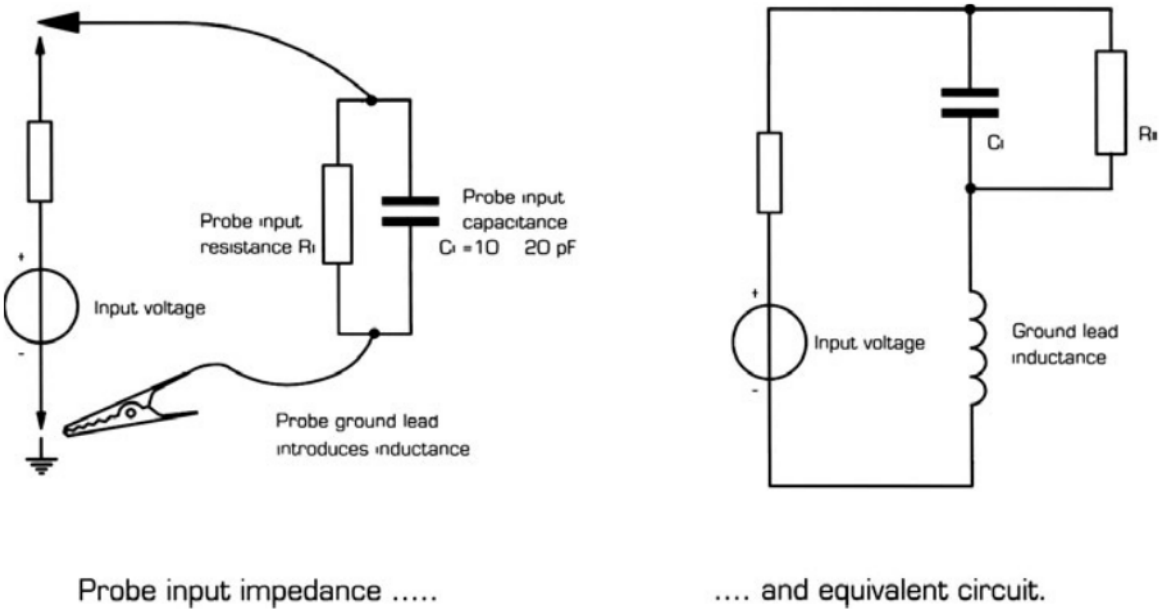


Figure 4.76 – À gauche, schéma équivalent électrique d'une sonde passive, à droite, schéma tenant compte de la longueur du fil de masse.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Avant de connecter une sonde assurez-vous qu'elle ne va pas mettre en court-circuit une partie du système testé ! D'un autre côté, si le système est au même potentiel de référence que la masse de l'oscilloscope, cela ne signifie pas qu'il faille reboucler par la terre.
Les câblages important des terres de sécurité ont beaucoup trop d'inductance pour cela servez-vous de la mise à la terre de la sonde comme connexion de référence du signal (*figure 4.77*).

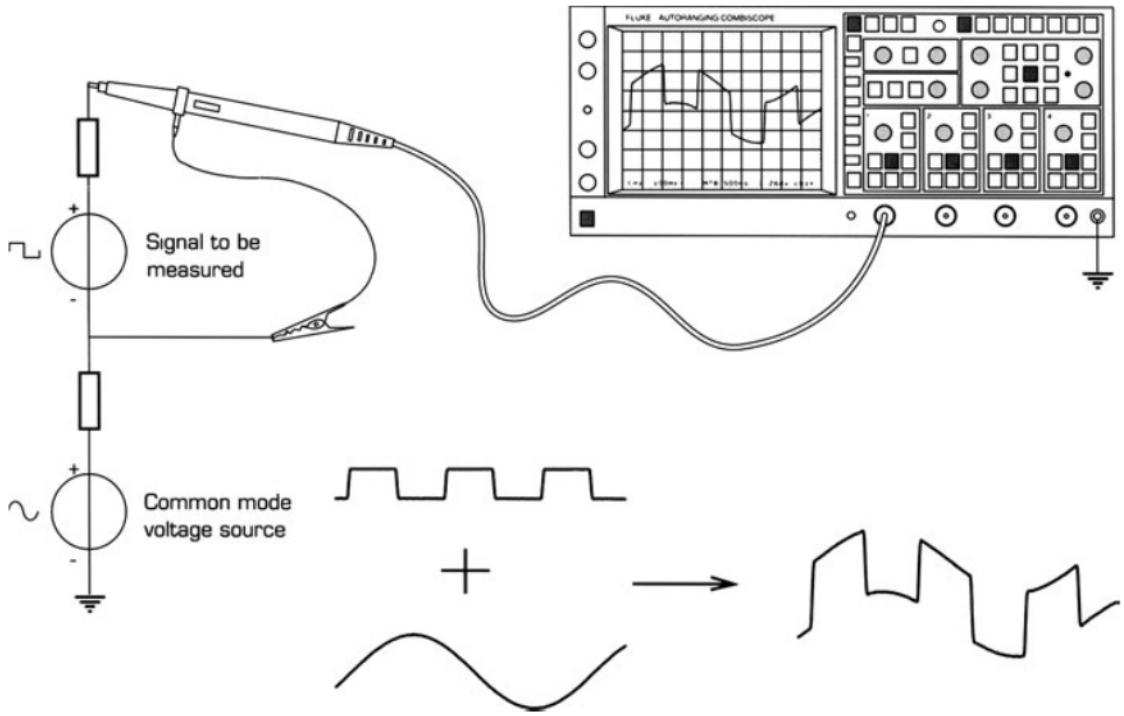


Figure 4.77 – Détails de la sonde passive de tension.

Les autres types de sondes

Sondes commutables : elles combinent la sonde 10:1 et 1:1, la position 10:1 est choisie pour sa faible charge et sa bande passante, l'autre 1:1 pour les signaux de faibles amplitudes et de basses fréquences.
Atténuateur de sonde : calibrée 100:1, elle possède une faible capacité de 2,5 pF et une résistance de 20 MΩ parfaitement indiquée pour des prélèvements de signaux sur les convertisseurs haute tension.
Amplificateur d'isolement : revoir § 4.3.
Sonde de courant : voir sonde à effet Hall de courant.

Accessoires supplémentaires

Sélecteur de ligne vidéo : il fournit des impulsions synchronisées de trames, de champ et de ligne nécessaires au déclenchement d'un oscilloscope, tout en lui permettant d'étudier des parties de lignes vidéos spécifiques.
Terminaisons : une charge de 50 Ω ou 75 Ω peut être commutée pour éviter des distorsions dues à une impédance d'un circuit à tester trop importante devant celle de l'oscilloscope.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Packs batteries : elles permettent l'utilisation autonome de l'oscilloscope (sans alimentation secteur) comme dans une voiture ou un avion par exemple. Cela permet d'éviter les boucles de masses si un système est relié à la terre ou également les mesures flottantes par rapport à la terre.

Divers : sacoche de protection, tablette, etc.

Logiciels

Chaque constructeur propose avec ses oscilloscopes numériques des logiciels d'acquisition et de traitement spécifiques. Ils permettent :

– de stocker des signaux ;
– de mémoriser des configurations de réglages de l'oscilloscope ;
– de mémoriser sur PC et de renvoyer un signal comme gabarit à l'oscilloscope pour effectuer un « test bon/mauvais » ;
– de traiter les points accumulés et copiés sous le logiciel d'acquisition dans un autre logiciel grand public pour retracer en tenant compte de coefficient divers notamment le coefficient d'une génératrice tachymétrique en électrotechnique…, le coefficient Kt pour avoir le couple utile en mesurant le courant sur un moteur à courant continu, etc. ;
– des traitements mathématiques, lecture par apposition de curseurs, mesures de valeurs…

On peut citer Open Choice® et SignalExpress®, remplaçants de Wavestar® chez Tektronix, BenchLink scope® chez Agilent Technologies, SX-Metro® multiscope pour Metrix (*figure 4.78*), Fluke View® chez Fluke…

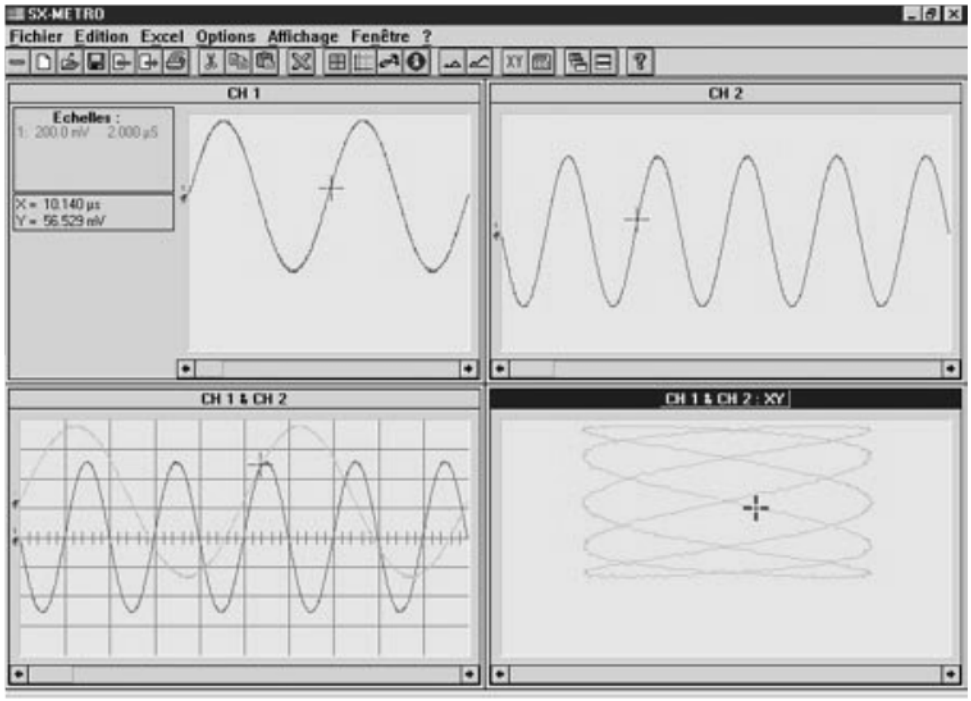


Figure 4.78 – Logiciel SX-Metro® (Metrix).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Certains constructeurs proposent à présent, sur leur modèle haute gamme, des logiciels de commande vocale d'oscilloscope : cela permet d'avoir les mains libres pour tester une plaque à grande densité de composants sans créer de courts-circuits et simultanément configurer l'oscilloscope au mieux.

4.4.7 Applications de la mesure avec un oscilloscope en électrotechnique

- Développement et mise au point de matériel électronique : réponse d'un filtre passe-bas.
- Maintenance préventive et dépannage.
- Électronique de puissance : commutation de semi-conducteur, test d'alimentations à découpage, de hacheur, d'onduleur… énergie dissipée par un semi-conducteur, aide au dimensionnement du dissipateur thermique.
- Électronique de commande : commande de hacheur sur une alimentation, test d'un convertisseur CNA…
- Motorisations : déséquilibre de phase…, relevé de vitesse de rotation via une génératrice tachymétrique… représentation du couple en fonction de la vitesse sur un moteur à courant continu…
- Qualimétrie : relevés harmoniques de la tension d'alimentation (FFT), test en sortie de variateur de vitesse.
- Automatismes : test de capteurs : signaux de sortie d'un codeur incrémental, test de boucle 0-10 V, régulation de température, asservissement de vitesse de moteur à courant continu.
- Enseignement et formation.
- Sécurité et prévention : test de disjoncteur différentiel, de relais thermique…
- Contrôle, qualité.

L'utilisation d'un oscilloscope paraît souvent très complexe.
Le chapitre précédant s'est forcé de démystifier l'ensemble des fonctions techniques de cet instrument en allant même jusqu'à rappeler des notions très théoriques.
Il est donc nécessaire pour un futur utilisateur ou déjà en période d'apprentissage ou de remise à niveau, d'avoir un organigramme très synthétique de son utilisation.
Il est clair que cet organigramme est non exhaustif et que certains réglages restent à effectuer, plus particulièrement :

- Passage en détection crête en automatique pour des relevés en sinusoïdal pur.
- Pour calibrer son oscilloscope, bien tenir compte de la nature de la mesure en efficace ou en instantané
- Utilisation du mode « mesure » ainsi que les « curseurs », très pratiques pour quantifier les grandeurs mesurées.
- Le réglage du « Level » (ou niveau de déclenchement) est prépondérant à la bonne acquisition en mode monocoup.
- Le choix de la base de temps et du calibre tension en fonction du type, de la nature et la grandeur du signal.
- La mise en mémoire des relevés, pour une superposition parfois nécessaire à une étude comparative.
- Les fonctions mathématiques à utiliser pour réaliser un produit (puissance instantanée, soustraction, FFT…).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– La synchronisation des relevés sur le secteur mode « line » pour des alimentations, des redresseurs commandés ou non commandés…

4.4.8 Organigramme d'aide à l'utilisation d'un oscilloscope

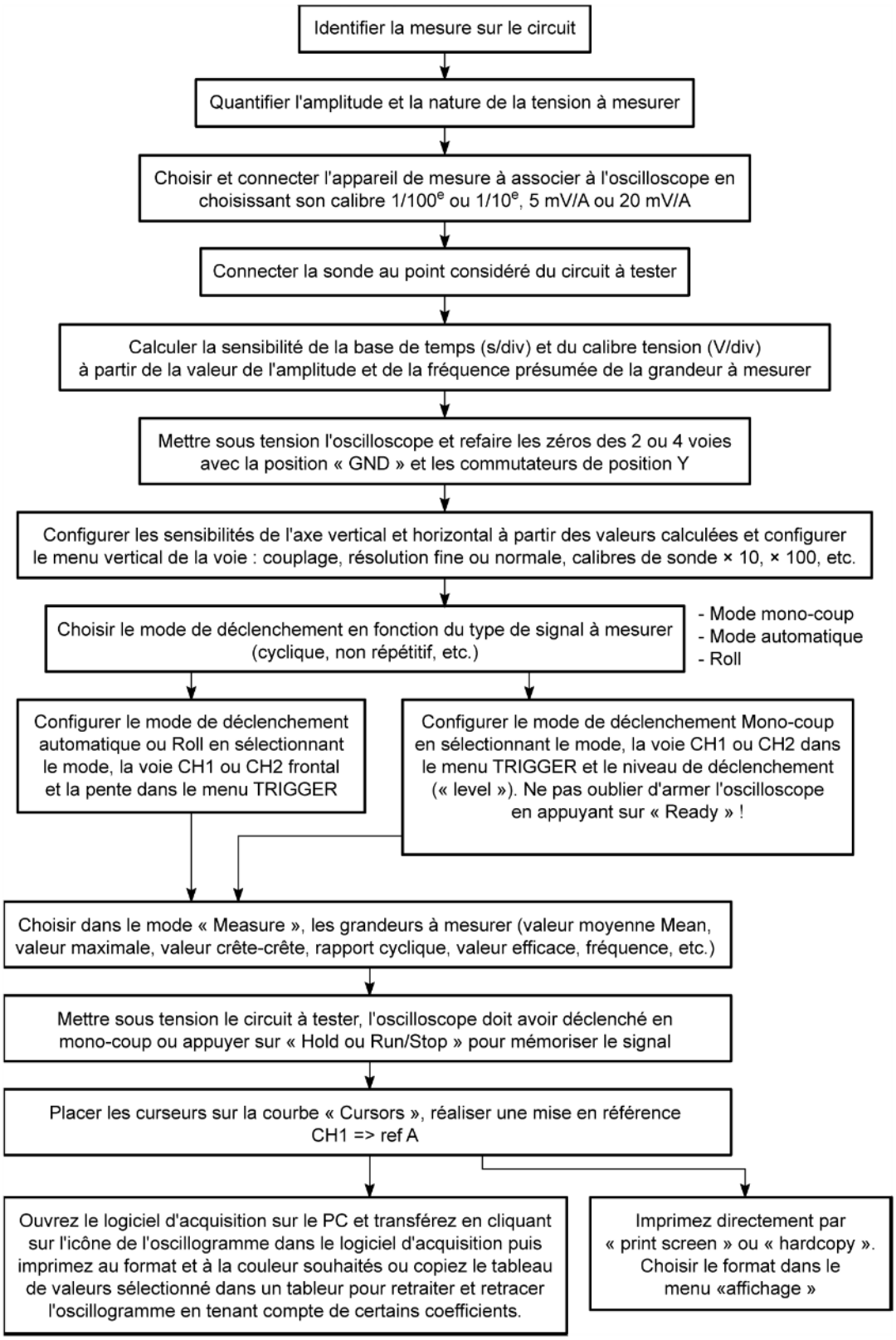


Figure 4.79 – Organigramme d'aide à l'utilisation d'un oscilloscope.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

- Technologie de fonctionnement : analogique, numérique ou mixte.
- Mode d'échantillonnage : temps réel ou temps équivalent.
- Bande passante en MHz.
- Nombre de voies.
- Voie isolée ou non.
- Vitesse d'échantillonnage max/voie en MS/s en monovoie.
- Capacité mémoire par voie en Kpoints.
- Résolution temporelle en répétitif en ns.
- Nombre de courbes affichées par seconde.
- Affichage en 3D (DPO).
- Écran couleur (à vide ou LCD).

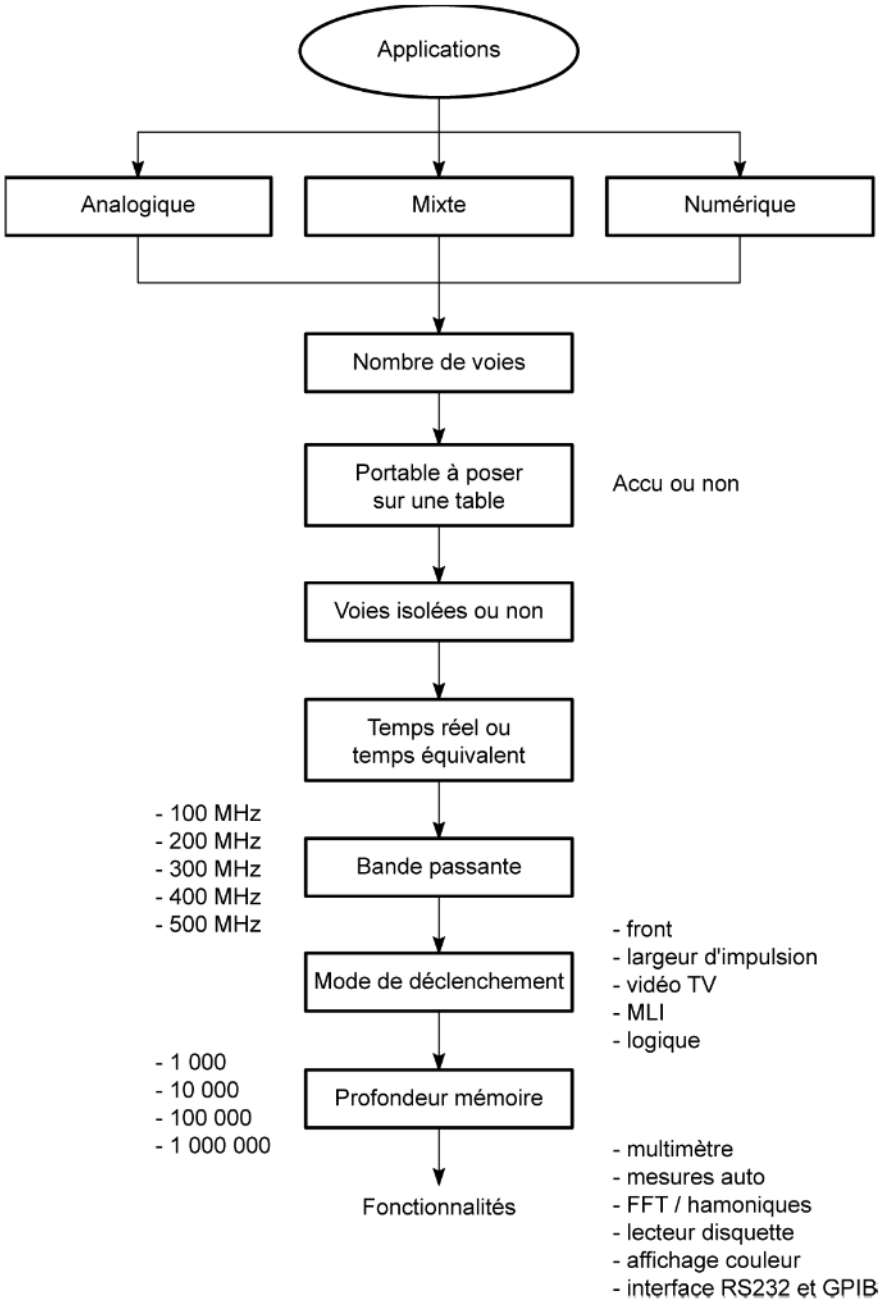


Figure 4.80 – Critères et organigramme de choix.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Fonctions mathématiques (multiplication, intégration, FFT, différentiation, soustraction…).
– Diagonale de l'écran.
– Interfaces de communication : RS232 ou GPIB, lecteur de disquette 3″ 1/4, USB2.
– PC intégré.
– Caractéristiques ergonomiques (poids, dimensions).
– Prix.

4.5 PC/multi-instrument : carte d'acquisition

4.5.1 Présentation générale

Les systèmes d'acquisition de données (DAQ) sur PC ont évolué très rapidement. La simple carte entrées/sorties analogiques et numériques a été dotée des capacités de mesure et de synchronisation grâce à deux facteurs évolutifs :

– l'électronique mise en œuvre sur les cartes DAQ ;
– l'informatique aussi bien au niveau du matériel que du logiciel : on peut lister comme évolutions, l'étendue et la standardisation des bus PCI et PCMCIA, la connectivité étendue et la disponibilité de systèmes d'exploitation performants.

Dans ce paragraphe seront traitées uniquement les cartes d'instruments de mesures sur PC ; la chaîne complète d'acquisition (*figure 4.81*) est composée :

– de capteurs correspondant aux grandeurs à mesurer ;
– de conditionneur de signaux ;
– de cartes DAQ d'acquisition de données ;
– de câbles et accessoires de connexion ;
– de logiciels.

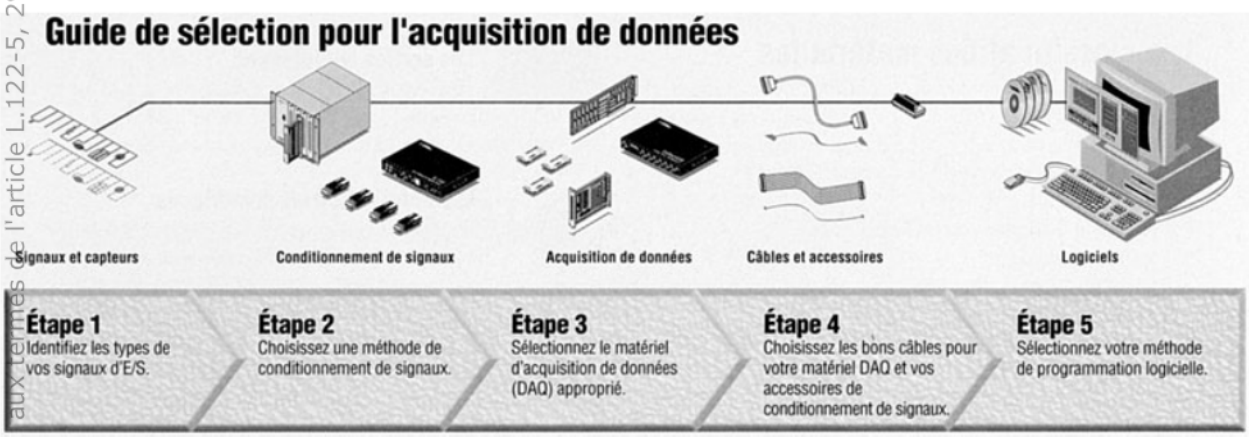


Figure 4.81 – Chaîne complète d'acquisition de données (d'après National Instruments).

4.5.2 Les bases de l'acquisition de données sur PC

L'acquisition de données désigne principalement les cartes d'entrées/sorties que l'utilisateur installe sur son PC. Elles sont répertoriées suivants le type de bus auxquelles elles se connectent (PCI, EISA, PCMCIA.)

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Une carte d'acquisition de données (DAQ) inclut plusieurs canaux d'entrée analogique, multiplexés sur un seul amplificateur d'instrumentation associé à un convertisseur analogique/numérique (CAN).

Les CAN sont cadencés à des fréquences qui dépassent rarement quelques millions d'échantillons par seconde.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Côté sorties des cartes DAQ

En général, une carte DAQ est à présent multifonctions, elle inclut généralement une combinaison de sorties analogiques pour commander ou pour générer des formes d'ondes, ainsi que des lignes numériques (TTL) et deux à trois compteurs/timers.

La vitesse de transmission des données de la carte vers la mémoire du PC dépend donc du PC et de son Bus. Il est important de ménager la puissance du processeur pour d'autres opérations. Des techniques permettent d'optimiser les transferts de données sur le bus ISA (en voie de disparition sur le marché), comme l'utilisation de canaux DMA (*Direct Memory Acess*) et UDMA qui assurent un transfert rapide de données dans la RAM du PC sans monopoliser le processeur.

■ Côté entrées des cartes DAQ

On ne peut appliquer n'importe quel signal. Les entrées analogiques en particulier n'acceptent souvent que des tensions dans la gamme – 10 à 10 V. L'utilisateur doit donc souvent faire précéder sa carte d'un système de conditionnement de signaux. Pour des thermocouples, des résistances thermiques et les jauges de contrainte (et beaucoup d'autres types de capteurs…) nécessitent un conditionnement spécial du fait de leur faible tension de sortie afin de les rendre compatibles avec le niveau de tension d'entrée de la carte DAQ, mais aussi pour assurer l'isolation galvanique évitant les surtensions et les boucles de masse. Pour les thermocouples, il est aussi nécessaire de procéder à une « compensation de soudure froide » et à la linéarisation du signal correspondant au type de thermocouple.

■ Les performances des cartes DAQ par rapport aux instruments de mesures dits conventionnels

À son apparition les cartes DAQ n'avaient pas bonne réputation : elles étaient difficiles à configurer, peu fiables, peu précises, lentes donc dédiées aux petites applications. Mais à présent les choses ont bien changé, le développement technologique est tel que les cartes DAQ haute résolution (16 bits), avec des vitesses d'échantillonnage dépassant le MHz, des fonctionnalités évoluées notamment au niveau des possibilités de déclenchement.

Comme le montre la *figure 4.82*, la comparaison des performances en terme de fréquence d'échantillonnage et de résolution entre l'instrumentation traditionnelle et les cartes DAQ tourne encore à l'avantage des instruments de mesures traditionnels mais les écarts tendent à se réduire. L'accroissement des performances vient notamment de l'utilisation de nouveaux composants fabriqués, les ASIC (électronique dédiée utilisant moins de composants).

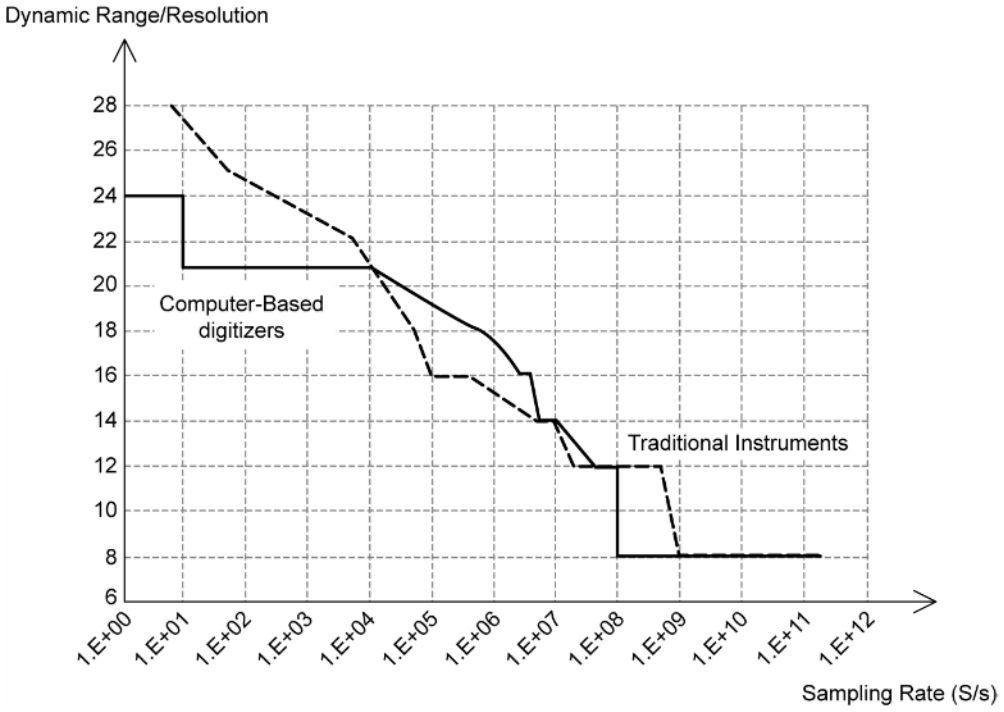


Figure 4.82 – Caractéristiques comparatives des cartes DAQ et des instruments de mesures conventionnels (d'après National Instruments).

De plus la précision globale des cartes DAQ a bénéficié du développement de la calibration logicielle, du perfectionnement de la conception analogique (multicouches, plans de masses, composants en surface) et de l'amélioration de la connectique et du câblage.

☐ Les différents bus pour des applications diversifiées

Avec l'augmentation des performances des processeurs (à 400 MHz, il y a 3 ans, aujourd'hui au GHz), les bus incorporés dans la technologie « fond de panier » ont effectué un bond en avant avec l'apparition du bus PCI, un bus haute vitesse, indépendant du processeur, autorisant des transferts de données à 132 Mo/s en 32 bits. Comparées aux 8 Mo/s théorique du bus ISA (en réalité à 1,5 Mo/s).
La possibilité d'opérer un transfert haut débit entre la carte DAQ et la mémoire RAM est cruciale pour l'analyse et l'affichage en temps réel dans les applications de mesures rapides.

Tableau 4.2 – Comparaison des caractéristiques des différentes technologies de bus.

	PCI	ISA (en voie de disparition) UDMA sur les nouveaux PC	PCMCIA
Taux de transfert maximal (théorique)	132 Mo/s	8 Mo/s	20 Mo/s
Capacités de DMA en mode maître	DMA placée sur la carte DAQ, celle-ci est maître du bus	DMA sur la carte mère du PC, la carte DAQ est esclave du bus	Non utilisable ou par Cardbus

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Avec le bus ISA, il fallait utiliser un contrôleur DMA intégré sur la carte mère du PC, pour déplacer rapidement les données d'un périphérique vers la mémoire système.

Le PCI, offre un circuit de prise de contrôle du bus directement sur la carte enfichable sans passer par le processeur qui peut à présent, se focaliser sur des opérations de traitement et d'affichage.

Les opérations gagnent en vitesse globale, le gain en puissance sera d'autant plus important que les applications sont complexes (nombre important de calculs, traitement du signal, affichages multicouches…).

Le bus PCMCIA a été développé pour les applications micro-ordinateur portable, généralisé depuis quelques années, ces cartes E/S au format carte de crédit a permis d'enrayer le problème de manque d'extension des PC portables. Seuls quelques fabricants réussissent, avec les progrès de la technologie ASIC (limitant le nombre de composants), de la connectique avec un connecteur 68 signaux E/S et du câblage blindé et léger, à réaliser des cartes multifonctions de ce format.

Mais la technologie PCMCIA n'autorise pas le transfert DMA en mode maître, il faut passer au produit CARDBUS qui combine le format à l'architecture PCI (opération sur 32 bits, bande passante de 132 Mo/s) et la possibilité de passer en mode maître.

■ Solutions multi-plateforme avec le PCI et le PCMCIA

L'un des principaux avantages des deux standards cités est qu'ils offrent des solutions multi-plateforme, une carte PCMCIA peut être insérée dans n'importe quel micro-ordinateur (Macintosh ou PC) à condition d'utiliser le driver logiciel compatible avec le système d'exploitation.

Le PCI est le standard « fond de panier » de tous les fabricants de micro-ordinateur.

L'exemple de la carte Eurosmart est transposable pratiquement à l'architecture de nombreux constructeurs, et permet de mesurer des signaux de tension qui sont convertis en mots numériques de 12 bits et interfacés via le bus PCI (*figure 4.83*). Elles possèdent 8 entrées simples ou 4 entrées différentielles (mesures flottantes) protégées jusqu'à 200 V crête-crête, configurables à volonté. Elle restitue un signal en tension de résolution 12 bits.

Son architecture est basée sur un circuit imprimé multicouche intégrant un composant programmable ACEX, libérant le microprocesseur du PC et remplissant la majeure partie des fonctionnalités de l'interface :

- Temps d'acquisition dont la base de temps 32 MHz est intégrée sur la carte.
- Gestion d'entrée des DMA (transfert de données direct de la mémoire) et FIFO (2 Ko, 512 mots de 32 bits) gérant le nombre d'entrée, les gains, le mode simple ou différentiel des entrées, moyennage, temps d'échantillonnage.
- Gestion de l'étage de sortie.
- La gestion des entrées/sorties logiques.
- La communication entre tous les étages et l'ordinateur via le bus PCI.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

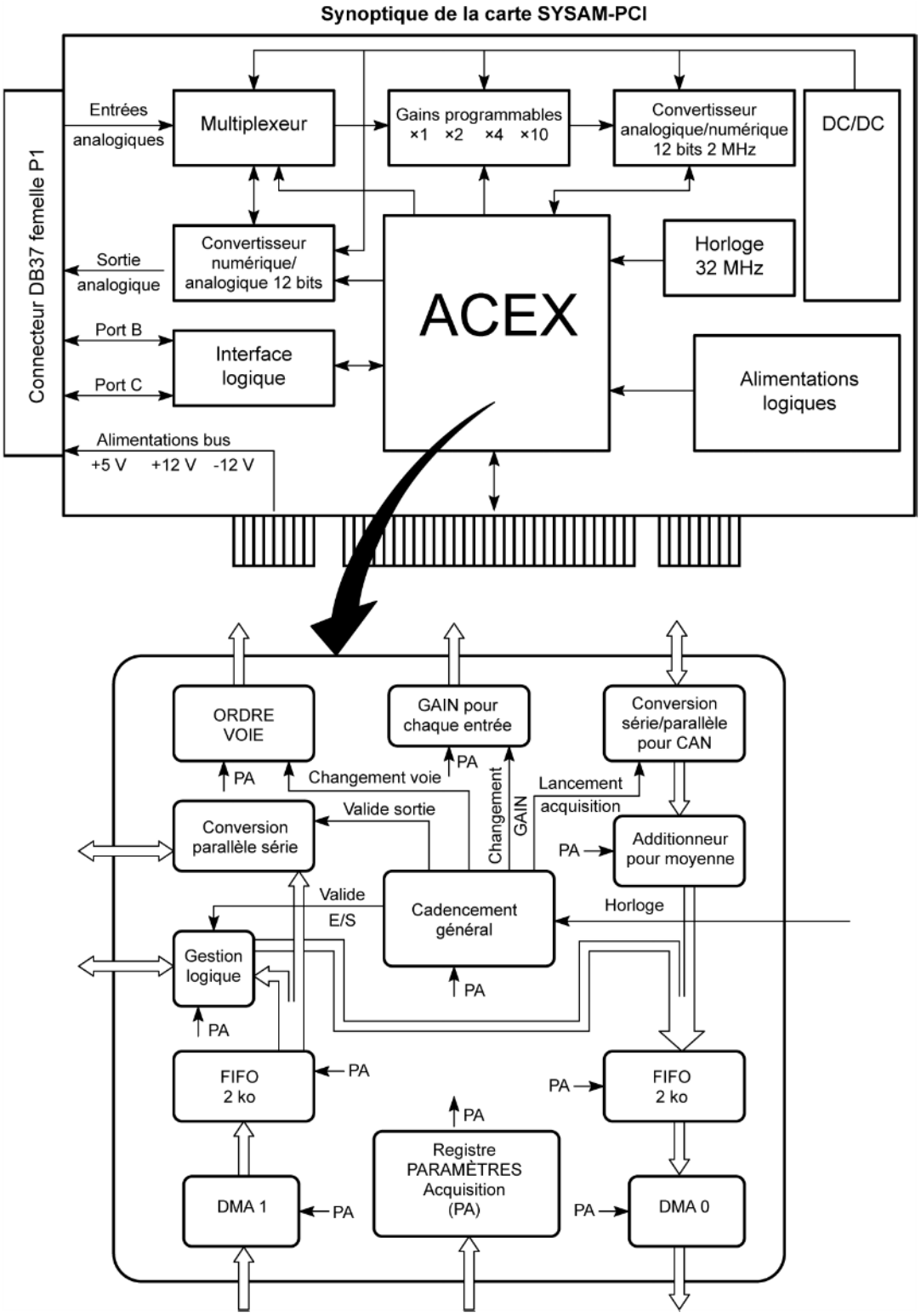


Figure 4.83 – Architecture d'une carte d'acquisition (d'après Eurosmart).

Elle est constituée d'un module de conversion analogique-numérique CAN 12 bits avec un temps de conversion minimal de 500 ns (fréquence d'échantillonnage 2 MHz), et d'un module CNA 12 bits associés à une interface 16 lignes d'entrées/sorties logiques dissociées en 2 ports de 2 × 4 bits chacun.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

4.5.3 Acquisition de données et instrumentation virtuelle

Le terme d'instrumentation virtuelle évoque un PC équipé d'une carte d'acquisition de données le transformant dès lors en instrument à part entière.
Composée comme d'un instrument classique des trois parties déjà vues :

– interface entrées/sorties (CAN/CNA) ;
– traitement de données (processeur embarqué associé à un logiciel) ;
– interface utilisateur.

L'intérêt du PC est de pouvoir déjà centraliser le traitement et l'interface utilisateur (affichage).
L'utilisateur face à des besoins divers n'est pas obligé de tout remplacer, il suffit de changer sa carte d'E/S et éventuellement de modifier ou changer le logiciel.
Certains constructeurs proposent même des châssis modulaires (système de rack) très flexible mais pas encore à la portée financière de tous.
C'est là le principe de l'instrumentation virtuelle, de profiter de la standardisation de la micro-informatique pour permettre aux utilisateurs de créer leurs propres systèmes d'instrumentation économiques et évolutifs.

■ Présentation des instruments virtuels

Ces cartes ont été pensées pour automatiser les mesures en utilisant la puissance et la souplesse d'un PC souvent en possession du client donc en réduisant les coûts par rapport aux instruments traditionnels de mesures.
Automatiser la mesure c'est garantir : un accès aux mesures, une analyse haute vitesse, une synchronisation multi-instrument, des fonctionnalités définies par l'utilisateur, un enregistrement des données et rapport en ligne, des logiciels d'instrumentation clés en main, solutions au format : portables, modulaires ou de bureau.

Multimètres numériques : 5 chiffres 1/2, répertorié classe II, multi-plateformes : PCI, CompactPCI, PCMCIA et ISA, mesures : AC/DC de 20 mV à 250 V, de 20 mA à 200 mA, résistance de 200 Ω à 200 MΩ, 2 ou 4 fils.

Oscilloscopes : mono ou deux voies, jusqu'à 16 millions d'échantillons/voie, échantillonnage en temps réel de 100 Méch/s, 1 Géch/s en RIS., entrées de 50 mV à 50 V, bande passante en entrée jusqu'à 100 MHz, déclenchement analogiques et numériques, multiplates-formes : PCI, Compact PCI, PXI, PCMCIA, USB et ISA.

Générateur arbitraire : vitesse de rafraîchissement de 40 Méch/s, 1 voie, résolution verticale de 12 bits, dynamique d'entrée de 60 dB, mémoire profonde jusqu'à 8 millions de valeurs, liaison de courbes, bouclage, et segments, génération de patterns numériques haute vitesse (16 bits), multiplates-formes : PCI, Compact PCI, PXI et ISA.

Analyseurs de signaux dynamiques : deux entrées/deux sorties ou quatre entrées, couplage AC/DC, vitesse d'échantillonnage de 5 à 204,8 kéch/s, vitesse de rafraîchissement de 1,25 kéch/s à 51,2 kéch/s, bande passante de 95 kHz, FFT Zoom temps réel, mesures de fréquences et de temps simultanées, CAN 16 bits, dynamique d'entrée de 90 dB, basés PCI.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Mesureurs de température et de tension : précision de ± 0,42 °C sur thermocouple de type J, compensation de soudure froide, remise à zéro automatique, détection de thermocouples ouverts, référencement à la masse, mesure de tension en 24 bits de résolution, jusqu'à 16 entrées analogiques, jusqu'à 8 lignes d'E/S numériques, gamme d'entrée ± 15 volts, multiplates-formes : PCI, Compact PCI, PXI, PCMCIA, USB et ISA.

Analyseur de données série : vitesse de E/S 10 Mo/s, deux voies d'E/S configurables, support RS232 et RS485, niveaux programmables entre ± 10 V, dont TTL, 3,3 V et ECL, déclenchement par voie, multiplates-formes : PCI, Compact PCI, PXI.

Matrices de commutation, contrôles d'axe, acquisition d'images : non abordés dans l'ouvrage.

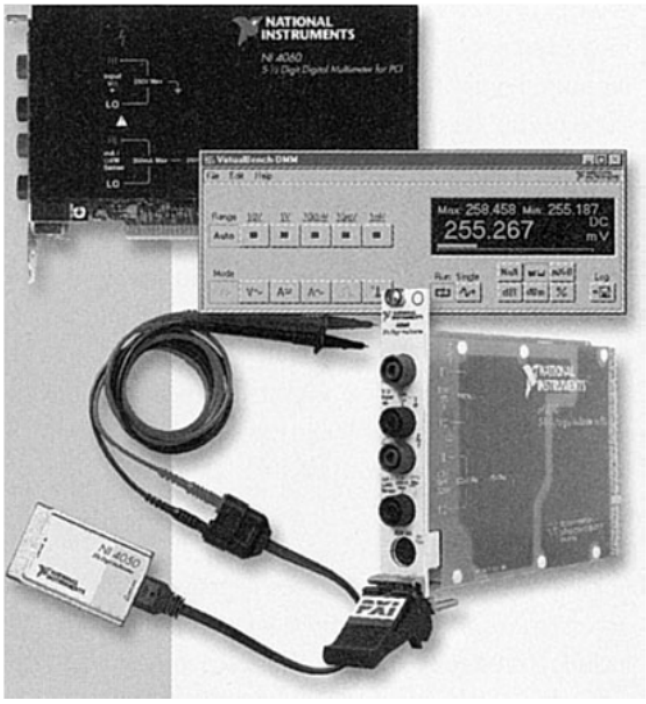


Figure 4.84 – Carte multimètre haute résolution PCMCIA ou PXI NI 4050 et 4060.

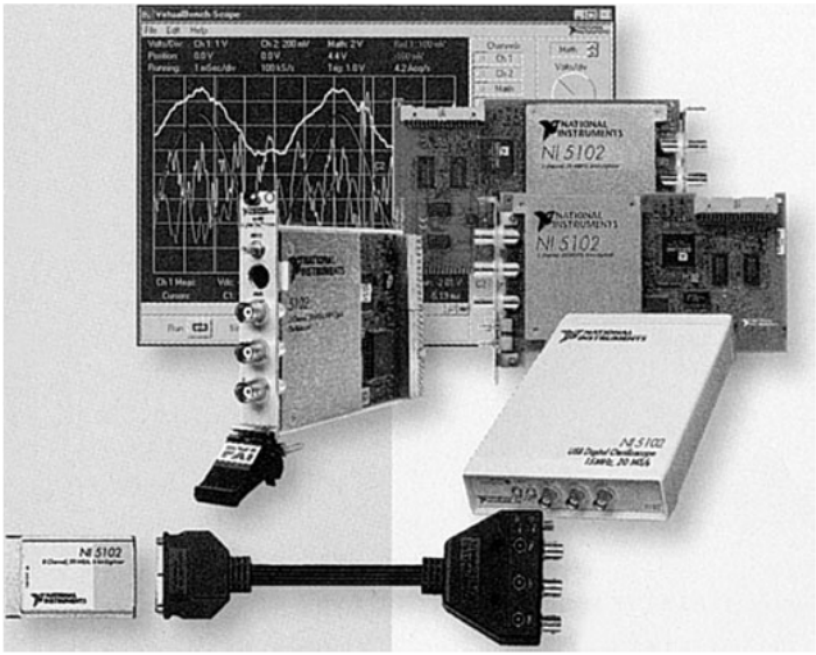


Figure 4.85 – Exemple de carte oscilloscope multibus NI 5102.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Remarque importante

Il est important de bien comprendre le principe d'utilisation de telles cartes quel que soit l'appareil à utiliser, nous ne pouvons passer en revue tous les constructeurs qui proposent sur le marché un nombre important et intéressant de déclinaisons d'instrument virtuel : Eurosmart, Keithley, National Instruments, Hewlett-Packard, Analog Devices, ComputerBoards, Oméga, Fluke, Iotech, Dat Translation, Digimétrie, Sacassa, SM2I… et bien d'autres.

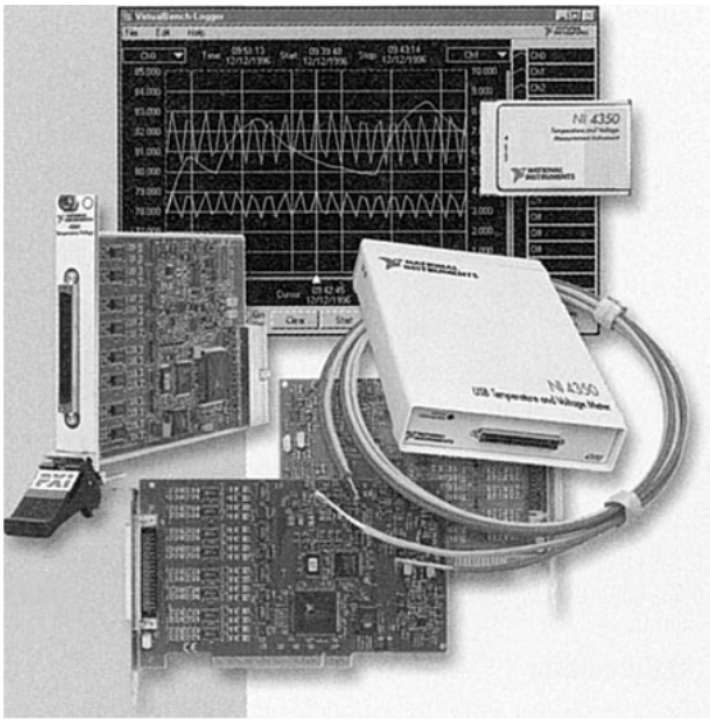


Figure 4.86 – Carte de mesure de température PXI et PCMCIA pour thermocouple NI 4350.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

4.5.4 Aide à l'utilisation d'une carte d'acquisition de donnée sur bus PCI

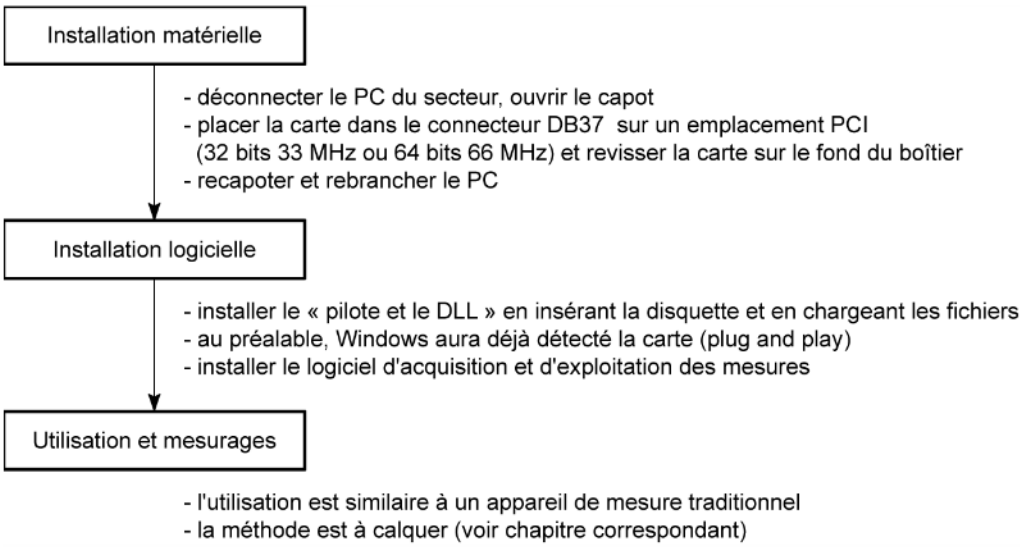


Figure 4.87 – Organigramme d'aide à l'utilisation d'une carte d'acquisition de donnée sur bus PCI.

L'installation d'un tel appareillage prend environ 15 minutes pour un novice !

4.5.5 Quelques exemples d'applications des cartes d'acquisition EUROSMART dans l'industrie en France

SNCF : mesure de différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la cabine lors du passage dans un tunnel.
EDF : mesure de puissance déformante sur le réseau.
APAVE : mesure de contrôle sur des moteurs.
AGROTEC : test sur des capteurs piézo.
AIFOBEP : mesure en labo pour l'étude de l'environnement.
LYONNAISE DES EAUX : mesure de pression d'eau pour le contrôle de l'environnement.
FROMAGERIE BEL : test de l'acidité du fromage.
MGB : mesure d'effort sur des pièces mécaniques.
SNR ROULEMENTS : mesure de contrainte mécanique sur des roulements.
RENAULT SPORTS : différentes mesures à la sortie des calculateurs.
Et aussi largement diffusé dans l'enseignement technique.

4.5.6 Choix d'une carte d'acquisition

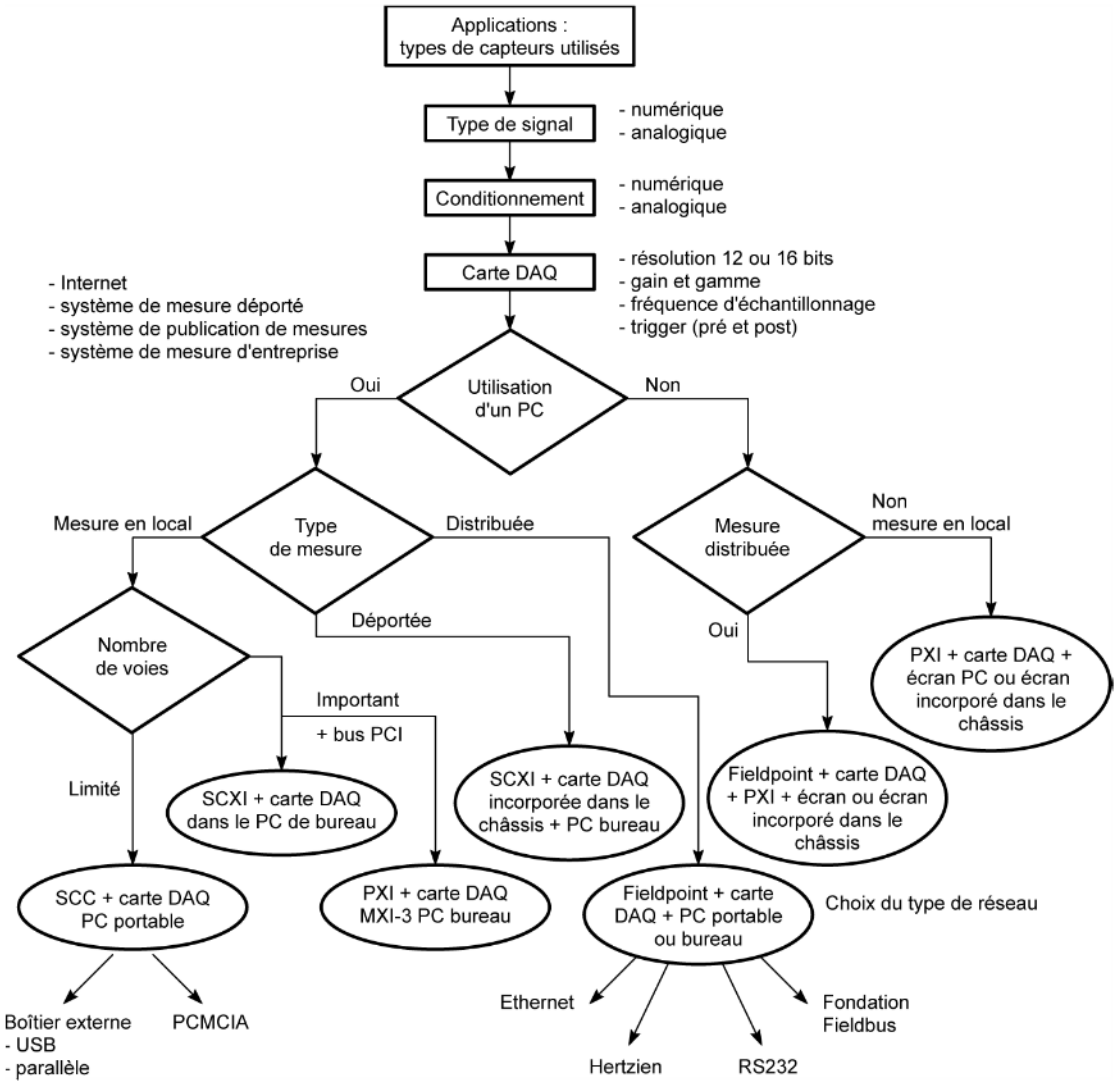


Figure 4.88 – Organigramme de choix.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Le choix d'une carte va principalement se faire en fonction de l'application à traiter :

- Le nombre de mesure à faire simultanément va déterminer le nombre d'entrées.
- La ou les fréquences à acquérir vont déterminer la fréquence d'échantillonnage de la carte.
- L'amplitude des tensions à acquérir définira la protection de la carte ainsi que ses calibres d'entrée.
- Utilisation sur site ou sur le terrain pour définir la portabilité du système.
- Les emplacements disponibles dans le PC définiront le type de connexion de la carte (PCI, RS232, IEEE, PCMCIA, etc.).
- Si l'application de l'utilisateur nécessite un outil logiciel existant, ou si une propre programmation est nécessaire. En effet tous les fabricants de cartes n'ont pas la solution logiciel d'accompagnement : les possibilités de programmation de la carte en fonction du langage à utiliser.
- Le budget sera également très déterminant.

L'organigramme de choix (*figure 4.88*) reprend tous les critères essentiels et décisifs sur lesquels s'appuyer pour réaliser au mieux le choix de l'instrumentation embarqué au plus près de l'application à traiter.

4.5.7 Conclusion

Tableau 4.3 – Avantages et inconvénients d'une carte d'acquisition et d'un oscilloscope.

	Avantages	Inconvénients
Oscilloscope	Grande bande passante Très répandu Bonne protection Facilité de mise en œuvre	Résolution 8 bits (78 mV de résolution sur un calibre 20 V), 12 à 21 bits pour une carte DAQ Seulement 2/4 entrées simples ou différentielles Pas de sortie Pas d'entrée/sortie logique (sauf oscilloscope spécialisé) Exploitation des courbes limitées Option d'acquisition limitée
Carte d'acquisition	Résolution 12 à 21 bits (4,8 mV de résolution sur un calibre 20 V) Plus d'entrées simples et différentielles Sortie analogique (1 à 2) Entrées/sorties logiques Grande possibilité d'options d'acquisition Polyvalence et flexibilité accrues Convivialité du logiciel, exportations des mesures vers d'autres	Limitée en bande passante Nécessite d'un ordinateur Moins répandu que l'oscilloscope Protection limitée (200 V maximum) Difficulté (pour certains) de mise en œuvre

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

En effet la carte d'acquisition ne peut prendre la place d'un oscilloscope pour des applications haute fréquence notamment mais sur une plage de fréquence et d'amplitude de tension inférieure, elle peut avoir, en présence d'un logiciel d'acquisition performant et convivial, un attrait important du fait de son rapport qualité/prix et par le fait qu'elle possède une ou plusieurs sorties analogiques évitant l'usage d'un générateur basse fréquence, voir même arbitraire car on peut soit même créer une tension à partir d'équations mathématiques entrées dans le logiciel.

Notons que le PC intégré à l'oscilloscope (Ultima de Gould), ne possède pas le même « rendement » qu'une carte d'acquisition oscilloscope.

Dans un PC, le premier conserve les avantages de l'oscilloscope en s'octroyant les fonctionnalités logicielles du PC.

Mais les applications dans l'industrie des cartes DAQ montrent les potentialités d'un tel équipement qui avec le développement incessant de l'informatique ne peut que se rapprocher des caractéristiques des appareils traditionnels.

Il existe de l'instrumentation intermédiaire entre l'oscilloscope et la carte d'acquisition intégrée à un PC, c'est l'instrumentation modulaire sur mesure dont nous allons par souci de concision abordé le principe général.

Bon nombre de constructeurs proposent des châssis modulaires ou des racks pouvant recueillir à volonté toutes les fonctionnalités possibles de l'acquisition de données : carte PC embarqué, cartes interfaces PCI, Ethernet, PCMCIA, oscilloscopes numériques, GBF, multimètres, mesure de température, contrôleur de servomoteur, compteurs/décompteurs, acquisition d'images haute qualité, interfaces CAN…

Chez National Instruments™, l'instrumentation modulaire PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) s'articule autour de l'architecture CompactPCI et de l'environnement Windows™ de Microsoft. Le CompactPCI offre un conditionnement durci et une connectivité hautes performances, associés à l'architecture PCI haute vitesse des PC de bureau actuels.

En conséquence, les produits PXI (*figure 4.89*) garantissent une totale interopérabilité avec le CompactPCI, offrant une bonne intégrité mécanique ainsi qu'une facilité d'intégration reconnue.

Le groupe LDS (Ling Dynamics System, anciennement Nicollet-Dactron-Gould) couvre les systèmes d'acquisition de moyennes et hautes performances (Genesis™), les centrales durcies (Liberty™) et les analyseurs de signaux dynamiques (oscilloscopes de capture de transitoires, Sigma™), du modèle ultra-portable (Photon II™) au modèle de laboratoire (Focus II™). Ces matériels sont présentés *figure 4.90*.

Le principe reste le même, la configuration à volonté ainsi que le très faible encombrement de ces matériels permettent d'obtenir la mesure de n'importe quelle grandeur dans des situations de terrains ou d'embarquements draconiens.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

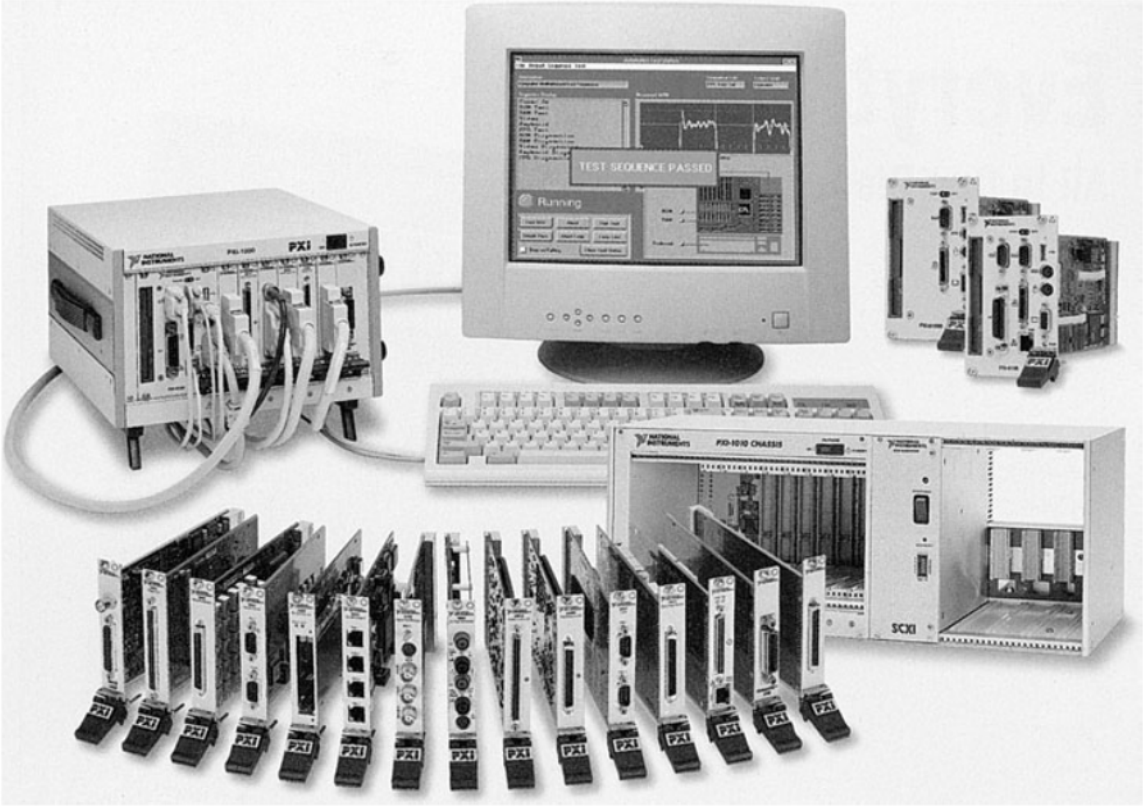


Figure 4.89 – Gamme PXI National Instruments alliant modularité et interopérabilité.

Figure 4.90 – Exemple de systèmes d'acquisition de moyennes et hautes performances LDS.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

5 • MESURE DE TERRE ET DE RÉSISTIVITÉ

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Objectif du contrôle de terre : contrôler que les courants de défauts pourront s'écouler dans la terre et que la tension de contact ne dépassera pas 50 V ou 25 V.

Objectif du contrôle de résistivité : choisir l'emplacement et la forme, les caractéristiques de la prise de terre et réseaux de terre avant leur construction et optimiser les coûts de construction (gain de temps pour obtenir la résistance de terre souhaitée).

Remarque

Le paragraphe 5.7.1 permet de définir la résistivité des sols ainsi que leurs valeurs.

5.1 Introduction

L'extraordinaire explosion de l'utilisation de l'électricité dans la vie quotidienne, tant privée que professionnelle, le formidable développement des réseaux de distribution qui a suivi a nécessité l'écriture de règles de l'art sur la construction des installations.

Afin de garantir la sécurité des personnes, vis-à-vis de ces installations et des équipements électriques connectés, des normes sont naturellement apparues et ont été mises à jour au fil des évolutions.

Toutefois, l'efficacité des mesures de sécurité mises en œuvre n'est garantie que si des contrôles réguliers peuvent attester de leur bon fonctionnement.

Les risques liés à une mauvaise utilisation de l'électricité peuvent présenter :

- de réels dangers pour la vie des personnes ;
- la mise en péril des installations électriques et des biens ;
- des conséquences néfastes pour le fonctionnement des systèmes et leur durée de vie.

Il était donc primordial de mettre en œuvre des dispositifs de sécurité particulièrement efficaces, dès que les niveaux de tension et de courant font courir de tels risques.

Nous aborderons successivement, les effets des défauts électriques sur le corps humain, les dispositifs de sécurités préconisés par les normes et les méthodes, ainsi que les moyens de mesure, de vérification et de maintenance des réseaux électriques.

5.2 Sécurité des personnes

5.2.1 Effets physiologiques du courant électrique

Une personne soumise à une tension électrique est soumise à une électrisation, et selon l'importance de celle-ci, la personne peut subir des effets plus ou moins graves. Les effets physiologiques du courant électrique entre 15 Hz et 1 kHz sont fonction de son intensité, les seuils sont :

– à partir de 0,5 mA : sensation faible, une gêne, c'est le seuil de perception ;
– à partir de 10 mA : contraction musculaire (tétanisation), c'est le seuil de « non-lâcher » ;
– à partir de 30 mA : fibrillation cardiaque irréversible, c'est le seuil de fibrillation ventriculaire.
  Ce seuil dépend du temps de passage du courant et du trajet emprunté par le courant au travers du corps humain, un coefficient de pondération appelé « facteur de courant de cœur » est utilisé.
  Ces effets diminuent avec la fréquence, au-dessus de 30 kHz ainsi qu'en continu, et à partir de 0,5 A, les effets de brûlure deviennent prépondérants.
– à partir de 1 A : arrêt cardiaque.

Des études effectuées dans le cadre de la CEI (Commission électrotechnique internationale) ont permis de déterminer les effets d'un courant traversant le corps humain.
La *figure 5.1* représente les effets physiologiques du courant, en fonction de l'intensité et du temps de passage.
La courbe en trait continu, repérée BB2, représente les limites de sécurité adoptées par la CEI.

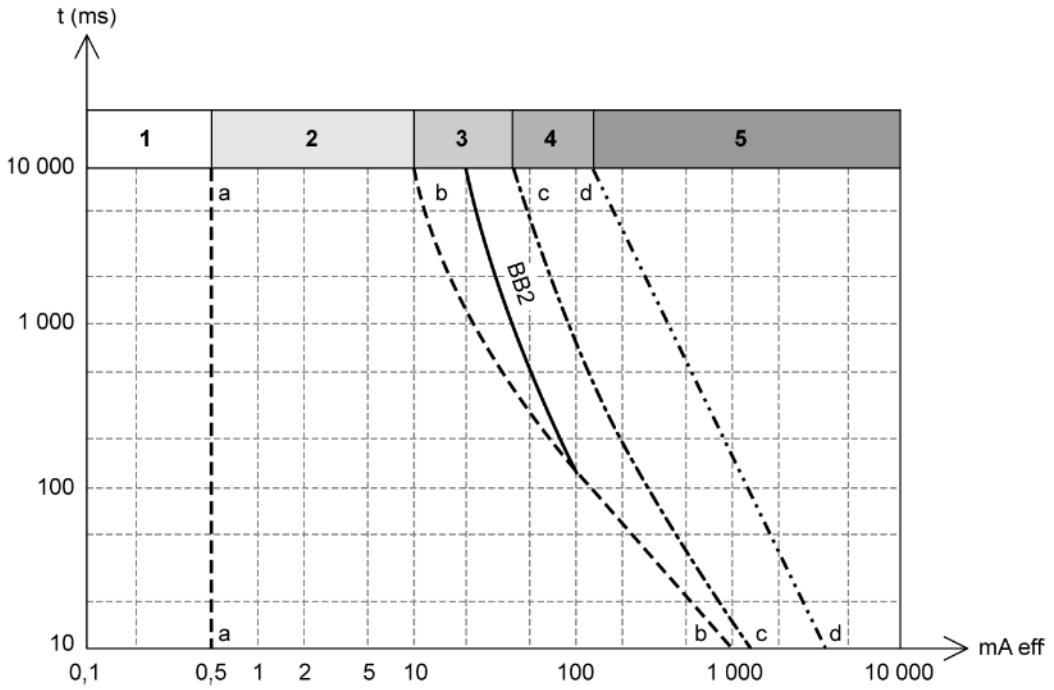


Figure 5.1 – Zone des effets du courant alternatif 50-60 Hz sur les adultes.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Zone 1 : habituellement aucune réaction.
– Zone 2 : habituellement aucun effet physiopathologique dangereux.
– Zone 3 : habituellement aucun risque de fibrillation.
– Zone 4 : fibrillation possible (probabilité jusqu'à 50 %).
– Zone 5 : risque de fibrillation (probabilité supérieure à 50 %).

5.2.2 Passage du courant électrique dans le corps humain

Le passage du courant électrique dans le corps humain est nécessairement provoqué par un **double contact**, avec deux éléments présentant une différence de potentiel (notée ddp ou V).
Généralement, l'un des contacts est une masse (sol conducteur, corps métallique : appareil, armoire, tuyau ou radiateur…), l'autre, également désigné « partie active », est de deux types :

– **contact direct**, conducteur actif (phase ou neutre) ou pièce conductrice habituellement sous tension ;
– **contact indirect**, masse métallique ou conductrice mise accidentellement sous tension à cause d'un isolant ou d'un composant défectueux, d'une déformation…

Dans ces deux cas le courant est fonction de l'impédance du corps humain : $I = V/Z$.
L'impédance du corps humain, et plus particulièrement celle de la peau qui est le premier « rempart résistif » au passage du courant, varie d'une façon très importante suivant l'environnement dans lequel il se trouve.
Elle comporte deux termes :

– *Zi*, l'impédance interne qui ne tient pas compte de la peau ;
– *Zp*, l'impédance de la peau qui décroît rapidement entre 50 et 100 V.

L'impédance conventionnelle du corps humain, de l'ordre de 2 000 Ω à 50/60 Hz. Au-dessus de 50 V cette impédance augmente rapidement quand la tension décroît et elle diminue quand la fréquence augmente, en raison de l'influence de la fréquence sur la sensation physiologique.
Un groupe de travail composé de médecins et d'experts en matière de sécurité a défini une autre courbe (*figure 5.2*) fixant la tension de contact non dangereuse en fonction du temps. Elle a conduit à la détermination d'une tension de contact permanente admise comme non dangereuse : 50 V pour les locaux secs.

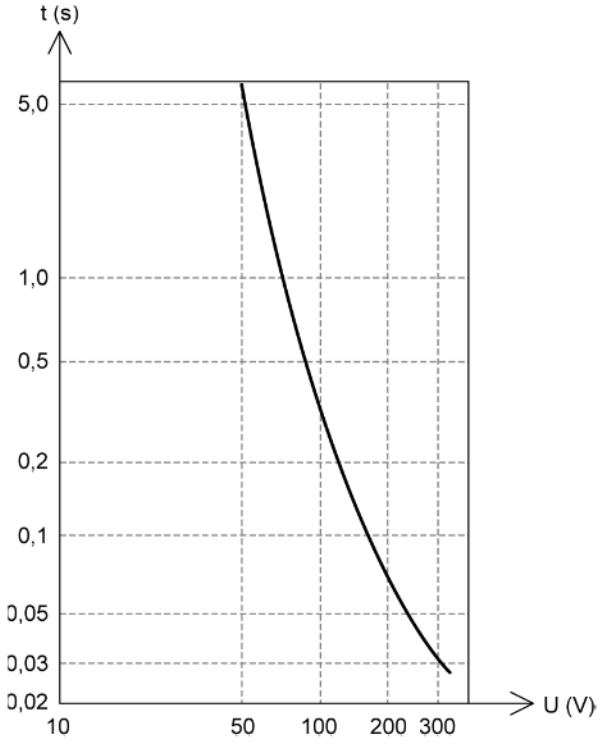


Figure 5.2 – La tension est ramenée à 25 V pour les locaux humides et à 12 V pour les locaux immergés.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Nécessité d'une prise de terre

C'est par souci de sécurité que le législateur a rendu obligatoire l'installation d'une prise de terre.
La norme NFC 15-100 impose pour les locaux humides ou à sol conducteur, la mise à la terre des appareils électrodomestiques comportant une enveloppe métallique.
Le décret du 14 novembre 1962 et les divers arrêtés ou notes techniques qui en découlent, conduisent à l'installation de prises de terre évitant des élévations dangereuses de potentiel des masses, mais, une prise de terre doit toujours être associée à un dispositif de coupure différentiel, sinon elle n'a pratiquement aucun intérêt.
Dans le cas général, et pour une bonne sécurité, ce potentiel ne doit pas dépasser 25 V, ce qui nécessite une prise de terre présentant une faible résistance.

5.2.3 Mesures de protection et dispositifs mis en œuvre

■ Contacts directs

En BT, les mesures de protection consistent à mettre les parties actives hors de portée ou de les isoler (isolants, barrières, enveloppes…). Une mesure complémentaire consiste à utiliser des DDR (dispositifs différentiels résiduels) à haute sensibilité $I\Delta n \leq 30$ mA, les DDR-HS ; cette mesure est nécessaire dans tous les cas où la mise en œuvre du schéma de liaison à la terre en aval n'est pas maîtrisée.

□ Réseau de distribution très basse tension

Si le risque est très important, la solution consiste à distribuer l'électricité sous une tension non dangereuse, c'est-à-dire à une tension inférieure ou égale à la tension de sécurité, c'est la TBTS (très basse tension de sécurité) toutefois ces très basses tensions sont obtenues à partir de transformateurs abaisseurs, ces derniers devront mettre en œuvre les dispositifs définis dans la norme NFC 52-220, afin d'éviter toute possibilité de liaison accidentelle entre le secondaire très basse tension et le primaire.

■ Contacts indirects

Cette mise sous tension accidentelle résulte d'un défaut d'isolement. Il y a circulation d'un courant de défaut entre la masse du récepteur et la terre, donc apparition d'une tension de défaut qui peut-être dangereuse si elle est supérieure à la tension de sécurité.
Les dispositifs de sécurité dépendent du type et du mode de distribution :

- Réseau de distribution BT à neutre à la terre (TT).
- Réseau de distribution BT à neutre isolé (TN).
- Réseau de distribution BT à neutre impédant, isolé de la terre (IT).

Trois principes fondamentaux doivent être utilisés :

- la mise à la terre des récepteurs et des équipements électriques ;
- l'équipotentialité des masses, simultanément accessibles ;
- la gestion du risque électrique c'est-à-dire la prévention : contrôle et maintenance des installations.

5.3 Sécurité des circuits

5.3.1 Historique

Dès 1900, aux débuts de l'utilisation de l'énergie électrique, il est rapidement apparu qu'il existait un risque électrique et qu'il était nécessaire de protéger les personnes.
Jusqu'en 1920, le transport et la distribution de l'électricité s'effectuent en « neutre isolé », les lignes sont nues et mise hors de portée, supportées par des isolateurs.
En 1923, apparition d'une « norme » qui « impose » la mise à la terre des masses des appareils : moteurs, appareils électrodomestiques, chauffes bains électriques, matériels électriques situés dans des locaux humides… Par contre la norme ne donne aucune indication concernant les conditions de mise à la terre, la valeur de la résistance de prise de terre et ne prévoit aucun dispositif de protection.
Le premier contrôleur d'isolement à sécurité positive fut installé dans les installations industrielles, une lampe est insérée entre chaque phase et la terre ; en cas de défaut d'isolement, la lampe s'éteint. Le premier schéma des liaisons à la terre est né : le **neutre isolé**. Jusqu'en 1955, le contrôleur permanent d'isolement à lampe (CPI) est utilisé, ensuite en 1962 apparaîtront les CPI à transistors et en 1972, les premiers CPI à injection de courant alternatif basse fréquence.
En 1927, un arrêté impose, en France la mise à la terre du neutre du transformateur en distribution publique pour les tensions supérieures à 150 VAC.
En 1935, le décret sur la protection des travailleurs et la norme C 310 (reprise par la norme C 11 en 1946) commence à parler du risque inhérent au défaut d'isolement. C'est à cette époque que l'on parle de mise à la terre des récepteurs et des dispositifs de coupure automatique, fusibles, « différentiels » ou relais voltmétriques de tension masse/terre.
En 1954, les premiers disjoncteurs différentiels sont fabriqués. Le **neutre à la terre** est né, mais il faudra attendre le décret du 14 novembre 1962 sur la protection des travailleurs et la norme C 15-100 bleue (28 novembre 1962) pour que des précisions soient données sur l'impédance de la boucle de défaut (prise de terre) en fonction du calibre des fusibles ou des seuils des DDR. La norme C 15-100 de 1962 officialise donc le neutre isolé, le neutre à la terre ainsi que la mise au neutre.
En 1973, un arrêté du ministère du Travail autorise la mise au neutre en France.
Les trois SLT normalisés (schémas de liaison à la terre) de la CEI 364 sont repris en France par la norme d'installation basse tension NF-C 15-100 : schéma TT, schéma TN, schéma IT.

5.3.2 Différents schémas de liaison à la terre (SLT)

Pour les éléments théoriques, se reporter au chapitre 7 (§ 7.4.2).
Les schémas de liaison à la terre servent à protéger les personnes et les biens contre les défauts d'isolement, les trois principaux schémas précédemment cités, possèdent la même efficacité pour la sécurité des personnes contre les contacts indirects, mais diffèrent en ce qui concerne la disponibilité de l'énergie et la maintenance de l'installation.
Le SLT en basse tension définit le mode de raccordement à la terre du secondaire MT/BT et le mode de raccordement à la terre des masses de l'installation.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Dans les trois schémas de liaison à la terre, appelés aussi régimes de neutre, la première lettre indique la liaison du neutre du transformateur par rapport à la terre, la deuxième lettre indique la liaison des masses de l'installation :

– Le neutre à la terre : TT, neutre du transformateur à la terre, masses à la terre.
– La mise au neutre : TN, neutre du transformateur à la terre, masses reliées au neutre.
– Le neutre isolé : IT, neutre impédant ou isolé de la terre, masses reliées à la terre.

Le schéma TN comporte plusieurs variantes :

– TN-C : conducteurs du neutre N et du PE sont confondus (PEN).
– TN-S : conducteurs du neutre N et du PE séparés.
– TN-C-S : utilisation d'un TN-S en aval d'un TN-C, l'inverse étant interdit.

Chaque SLT peut s'appliquer à l'ensemble d'une installation électrique BT, mais plusieurs SLT peuvent coexister au sein d'une même installation.

■ Neutre à la terre ou schéma TT

Ce schéma est obligatoire pour toutes les installations des particuliers ou recevant du public.
Comme schématisé sur la *figure 5.3* :

– Le neutre du transformateur est mis à la terre ainsi que les masses des récepteurs.
– La coupure du premier défaut par un DDR s'effectue dès que :
  UL = 50 V pour les installations en milieu sec,
  UL = 25 V pour les installations en milieu humide.

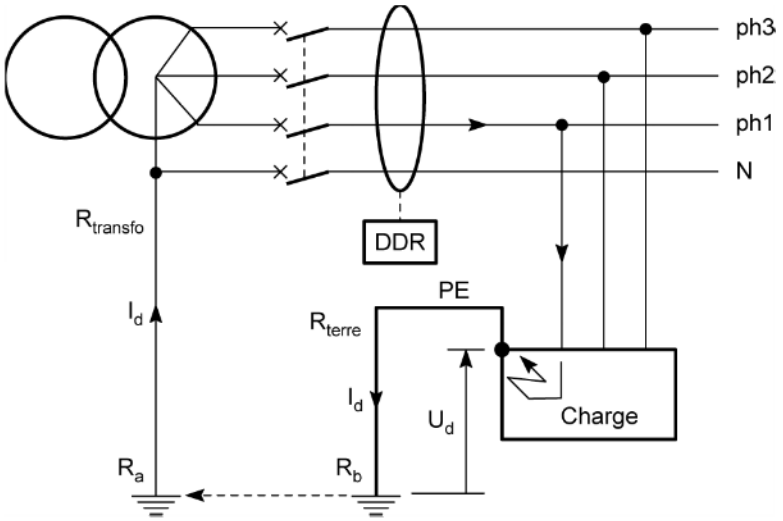


Figure 5.3 – SLT TT.

Pour les éléments théoriques, se reporter au § 7.4.2 « Étude du schéma de liaison à la terre TT ».

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 5.1 – Valeur maximale de résistance de la prise de terre des masses en fonction de la sensibilité des DDR et de la tension limite *UL*.

UL	50 V	25 V
3 A	16 Ω	8 Ω
1 A	50 Ω	25 Ω
500 mA	100 Ω	50 Ω
300 mA	166 Ω	83 Ω
30 mA	1 660 Ω	833 Ω

□ Mise en œuvre

Le courant de défaut étant très largement inférieur aux réglages des dispositifs de protection à maximum de courant, il est nécessaire de placer, en tête d'installation, au moins un DDR.

Pour améliorer la disponibilité de l'énergie électrique, l'emploi de plusieurs DDR permet de réaliser une sélectivité ampèremétrique et chronométrique au déclenchement. Tous ces DDR auront un seuil de courant assigné $I\Delta n$ inférieur à *Ido*.

Le temps de mise hors tension par les DDR doit être inférieur à 1 s (≤ 5 s si Ra et Rb sont interconnectés).

La protection par DDR :

– est indépendante de la longueur des câbles ;
– autorise plusieurs prises de terre Ra séparées, mais attention le PE n'est plus dans ce cas une référence de potentiel unique pour l'ensemble de l'installation.

■ Mise au neutre ou schéma TN

Ce schéma (*figure 5.4*) est surtout utilisé pour les installations tertiaires et industrielles.

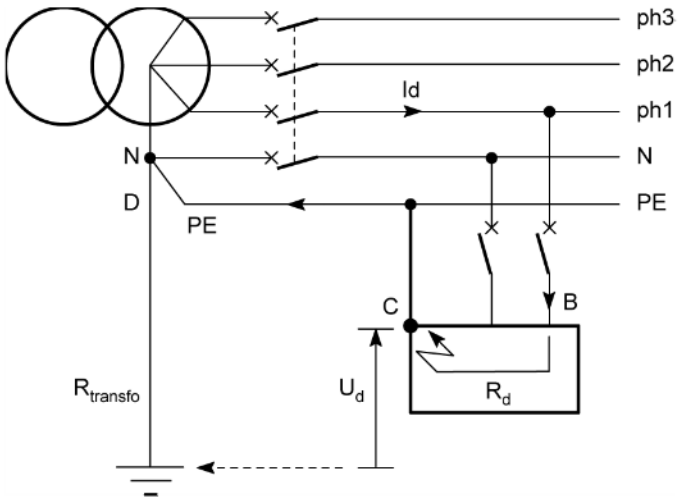


Figure 5.4 – SLT TNC.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Le neutre du transformateur est mis à la terre et les masses des récepteurs sont connectées au neutre.
– S'il y a défaut d'isolement, on peut l'assimiler à un court-circuit et le circuit correspondant est déconnecté par une protection contre les surintensités (DPCC = fusibles ou disjoncteur).
– Un schéma TN-S en aval permet d'utiliser des DDR.

Pour les éléments théoriques, se reporter au § 7.4.2 « Étude du schéma de liaison à la terre TN ».

☐ Protection contre les courts-circuits

DPCC : disjoncteur ou fusible, avec un temps maximal de coupure fonction de UL (*cf.* CEI 364 et NFC 15-100), le défaut d'isolement dans ce cas est assimilé à un court-circuit phase-neutre.

Tableau 5.2 – Temps de coupure en SLT TN.

U_0 Tension phase-neutre	Temps de coupure pour *UL* = 50 V	Temps de coupure pour *UL* = 25 V
127 V	0,8 s	0,35 s
230 V	0,4 s	0,2 s
400 V	0,2 s	0,05 s
> 400 V	0,1 s	0,02 s

☐ Mise en œuvre

Pour que la protection soit efficace il faut, quel que soit le lieu du défaut, que le courant *Id* soit supérieur au seuil de fonctionnement de la protection *Ia* (*Id* > *Ia*). Cette condition doit être vérifiée lors de la conception de l'installation par le calcul des courants de défaut, ceci pour tous les circuits de la distribution :

– pour un disjoncteur *Ia* = *Im* (*Im* courant de fonctionnement du déclencheur magnétique ou court retard) ;
– pour un fusible, courant tel que le temps total de coupure du fusible soit conforme à la norme (voir *tableau 5.2*), *m* = *Sph*/*SPE*.

Si la longueur de la ligne est supérieure à L_{max}, il faut soit diminuer *Ia* soit augmenter *SPE*, soit mettre en œuvre un dispositif différentiel résiduel (DDR), dans ce cas un schéma TN-S en aval permet d'utiliser des DDR.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

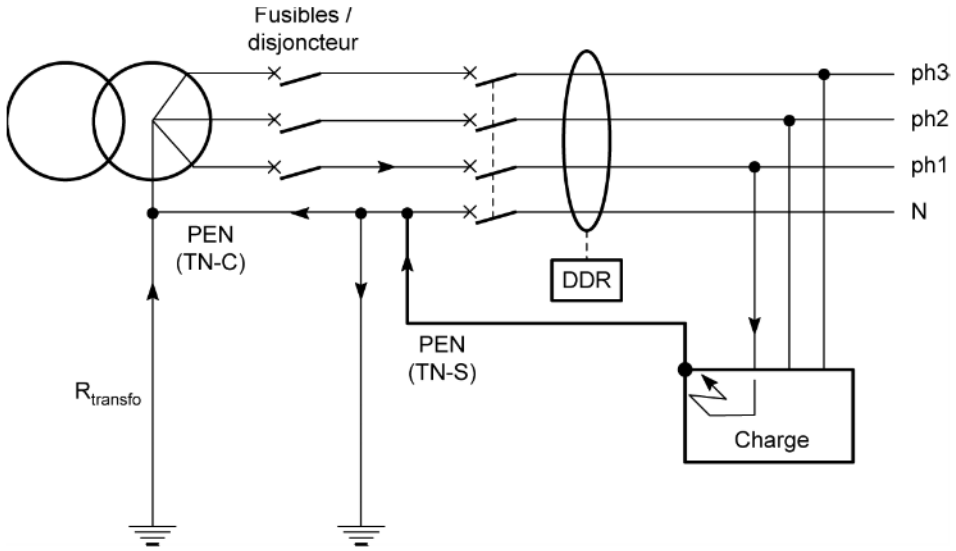


Figure 5.5 – SLT TNS.

■ Neutre isolé ou impédant, ou schéma IT

Ce schéma (*figure 5.6*) est surtout utilisé pour les installations sensibles aux coupures (industrie, hôpitaux…).

– Le neutre du transformateur est isolé, non relié à la terre. Les prises de terre des masses des récepteurs sont normalement interconnectées (comme pour le SLT TN ou TT).
– Le premier défaut est signalé par le CPI (contrôleur permanent d'isolement).
– Le deuxième défaut est coupé par un dispositif contre les surintensités.

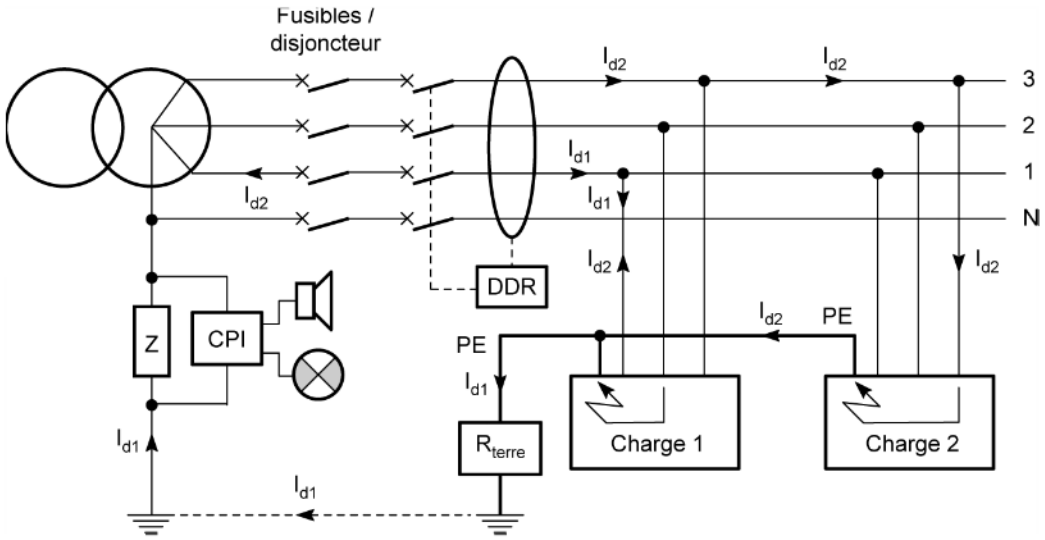


Figure 5.6 – SLT IT.

Pour les éléments théoriques, se reporter au § 7.4.2 « Étude du schéma de liaison à la terre IT ».

Il est théoriquement isolé, mais relié à la terre par les capacités parasites du réseau et/ou par une impédance de l'ordre 1 500 Ω d'où son appellation « neutre impédant ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

En absence de défaut d'isolement, le réseau est mis à la terre par l'impédance de fuite du réseau, qui est fonction de la longueur du câble.
Pour déterminer le potentiel par rapport à la terre d'un réseau de faible longueur en SLT IT, il est conseillé de placer une impédance $Zn = 1\,500\ \Omega$ entre le neutre du transformateur et la terre.
En présence d'un défaut d'isolement, au premier défaut, dans le cas du neutre impédant, le courant de premier défaut est très faible car limité par la présence de l'impédance.
La tension de défaut induite est faible et non dangereuse et l'installation peut être maintenue en service, par contre il faut signaler le défaut, le localiser et l'éliminer.
Le défaut est signalé par un contrôleur permanent d'isolement (CPI) qui surveille tous les conducteurs actifs, y compris le neutre (NFC 15-100), la recherche est réalisée à l'aide de localisateurs de défaut.
Lorsqu'un deuxième défaut apparaît et que le premier défaut n'a pas été éliminé, trois cas sont à envisager :

– **Le défaut concerne le même conducteur actif** : rien ne se passe et l'exploitation peut continuer.
– **Le défaut concerne deux conducteurs actifs différents** : si toutes les masses sont interconnectées, le défaut double est un court-circuit (via le PE). Le risque d'électrisation est similaire à celui rencontré avec le SLT TN.
– **Le défaut concerne deux conducteurs actifs différents, mais toutes les masses ne sont pas interconnectées**.

Pour des masses mises à la terre individuellement ou par groupe, chaque circuit ou chaque groupe de circuits doit être protégé par un DDR.
En cas de défaut d'isolement au niveau des groupes raccordés à deux prises de terre différentes, le comportement du SLT par rapport au défaut d'isolement (*Id*, *Ud*) est analogue à celui d'un schéma en TT (le courant de défaut passe par la terre).
La protection des personnes contre les contacts indirects est alors assurée comme spécifié au *tableau 5.3*. Étant donné les temps prescrits, une sélectivité chronométrique horizontale peut être réalisée pour privilégier la continuité de service sur certains départs.

Tableau 5.3 – Temps de coupure au deuxième défaut en SLT IT.

U_0/U volts*	*UL* = 50 V Temps de coupure (en s)		*UL* = 25 V Temps de coupure (en s)	
	Neutre non distribué	Neutre distribué	Neutre non distribué	Neutre distribué
127/230	0,8	5	0,4	1
230/400	0,4	0,8	0,2	0,5
400/690	0,2	0,4	0,06	0,2
580/1000	0,1	0,2	0,02	0,08

* U_0 : tension phase-neutre. U : tension entre phases.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Nota : la norme NFC 15-100 impose un limiteur de surtension installé entre neutre du transformateur HTA/BTB et la terre (Rb), pour protéger un réseau BT isolé de la terre (SLT IT) contre les élévations de tension (amorçage dans le transformateur HTA/BTB, contact accidentel avec un réseau de tension plus élevée, foudre sur le réseau BTB).

■ **Précautions essentielles**

Pour assurer le bon fonctionnement des différents schémas de terre, il est essentiel de :

– réaliser de bonnes prises de terre, contrôler que les courants de défauts pourront s'écouler correctement et s'assurer que la tension de défaut ne dépassera pas les tensions de sécurité : 50 V en milieu sec et 25 V en milieu humide ;
– contrôler qu'aucun courant de fuite ne circulera dans l'installation ;
– contrôler que la résistance du conducteur de masse (PE) est suffisamment faible ;
– contrôler que les dispositifs de protection sont compatibles avec la sécurité.

5.4 Prises de terre

La réalisation d'une bonne prise de terre dépend de trois éléments essentiels :

– la nature de la prise de terre ;
– la nature et la résistivité du terrain ;
– le conducteur de terre.

5.4.1 Nature des prises de terre

Les prises de terre peuvent être de l'un des types suivants (NFC 15-100) :

– Piquets ou tubes métalliques verticaux.
– Rubans ou câbles enfouis horizontalement.
– Plaques métalliques.
– Ceinturages métalliques à fond de fouilles recommandés par la C 15-100 dans le cas de construction comprenant des armatures en béton précontraint. Cette solution offre l'avantage de disposer d'une prise de terre dès le début du chantier (mise à la terre des appareillages de chantier).
– Armatures de bétons noyées dans le sol.
– Canalisations métalliques de distribution d'eau, avec l'accord du distributeur d'eau, et sous certaines conditions décrites dans la C 15-100 (§ 542.2.2.1).
– Autres structures enterrées appropriées (voir C 15-100 § 542.2.2.2).
– Il est nécessaire dans certains cas de disposer de prises de terre particulières :
  • prise de terre par forages, pour atteindre les couches humides dans les régions rocailleuses, il est dans ce cas nécessaire de réaliser une étude géologique. Cette technique permet d'obtenir des puits de terre de valeur stable dans le temps, la résistivité des terrains étant, à partir de quelques mètres, insensible aux variations saisonnières ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

- prises de terre immergées en mer, appelées aussi « prises de mer » (phares, plates-formes pétrolières…), dans ce cas le conducteur de terre doit pouvoir absorber en particulier l'amplitude des marées.

– Réseaux maillés de l'ensemble des puits de terre, utilisés dans le cas de sites étendus, afin d'égaliser le potentiel, en particulier en cas d'orage.

La résistance de la prise de terre ainsi constituée dépendra de sa forme, de son implantation sur le terrain, donc de la résistivité de celui-ci.

5.4.2 Notion sur la résistivité du terrain

La résistivité d'un terrain s'exprime en Ω.m, ce qui correspond à la résistance théorique en ohms d'un cylindre de terrain de 1 m^2 de section et de 1 m de longueur, elle traduit la résistance d'un terrain face à la circulation d'un courant.
La résistivité est un élément très variable suivant les régions et la nature des terrains. Elle dépend du taux d'humidité et de la température, le gel ou la sécheresse augmente la résistivité des sols.
Le *tableau 5.4* donne les valeurs de résistivité pouvant être estimées, mais d'autres facteurs peuvent intervenir et modifier ces valeurs.

Tableau 5.4 – Résistivité des différentes natures de terrains.

Nature du terrain	Résistivité en Ω.m		
Terrains marécageux	de quelques unités	à	30
Limon	20	à	100
Humus	10	à	150
Tourbe humide	5	à	100
Argile plastique	50		
Marnes et argiles compactes	100	à	200
Marnes du jurassique	30	à	40
Sable argileux	50	à	60
Sable siliceux	200	à	300
Sol pierreux nu	1 500	à	3 000
Sol pierreux recouvert de gazon	300	à	500
Calcaires tendres	100	à	300
Calcaires compacts	1 000	à	5 000
Calcaires fissures	500	à	1 000

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 5.4 – Résistivité des différentes natures de terrains. *(Suite)*

Nature du terrain	Résistivité en Ω.m		
Schistes	50	à	300
Micaschistes	800		
Granits et grès en altération	1 500	à	10 000
Granits et grès très altérés	100	à	600

Par exemple :

– La résistivité d'un terrain dépend de son taux d'humidité et de sa température (le gel ou la sécheresse augmentent la résistivité des terrains).
– Les couches des sous-sols, parcourues par des courants d'eau, comme on en trouve au voisinage des rivières, ne conviennent que rarement à l'établissement des prises de terre. Ces couches sont en effet formées de terrains caillouteux, très perméables, délavés par une eau elle-même purifiée par filtration naturelle et présentant une grande résistivité.

5.4.3 Valeur des prises de terre

Cette valeur est définie par la tension de sécurité à respecter et le calibre du différentiel qui sera installé. Par exemple, en milieu sec, la résistance de la prise de terre ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :

– Calibre 30 mA = 1 667 Ω.
– Calibre 100 mA = 500 Ω.
– Calibre 300 mA = 167 Ω.
– Calibre 500 mA = 100 Ω.

5.4.4 Qualités d'une prise de terre

Sur le plan théorique, on peut réaliser une prise de terre au moyen d'un piquet enfoncé dans le sol. L'écoulement d'un courant de défaut se fera donc d'abord à travers les résistances de contact qui se subdivisent elles-mêmes en une multitude de résistances constituées par les intervalles existant entre chacun des constituants du terrain considéré.

À une certaine distance de la prise de terre, le nombre des résistances de contact en parallèle tend vers l'infini et constitue une résistance équivalente quasiment nulle (*figure 5.7*). À partir de cette limite, quel que soit le courant de défaut, le potentiel est nul. La zone de référence qui constitue la réelle mise à la terre est atteinte.

Il existe donc autour de chaque prise de terre une zone d'influence dont on ignore la forme et l'étendue (*figure 5.8*).

La qualité d'une prise de terre dépendra donc de sa forme, de sa surface et de son emplacement dans le terrain.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

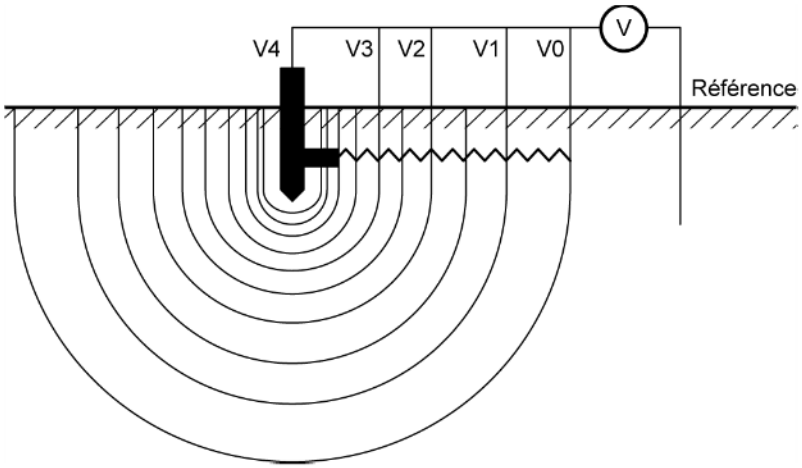


Figure 5.7 – Représentation des potentiels engendrés par un courant de défaut via les résistances fictives modélisant la zone d'influence d'un piquet de terre.

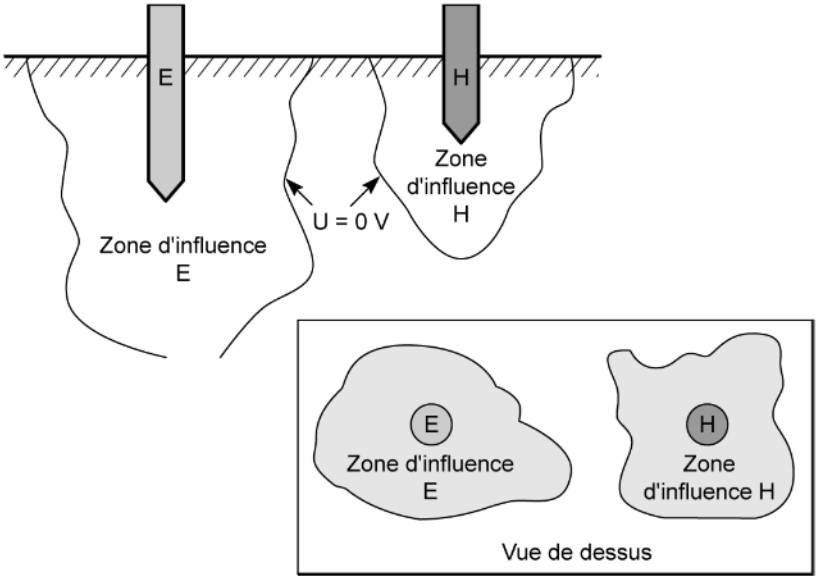


Figure 5.8 – Zone d'influence d'une prise de terre.

5.5 Conducteurs de terre

Le conducteur de terre assurant la liaison entre la prise de terre et les conducteurs de protection des bâtiments ou installations est souvent appelé « canalisation principale de terre ».

Elle est réalisée dans les constructions récentes en barres (sections méplates ou rondes), en câbles isolés ou nus de 16 mm^2 minimum s'ils sont protégés contre la corrosion, 25 ou 50 mm^2 selon qu'ils sont en cuivre ou en acier galvanisé (selon C 15-100 § 542.3).

En ce qui concerne les constructions anciennes, si la mise en place d'un conducteur de terre principal entraîne des difficultés ou un coût qui conduisent à l'abandon du projet, il sera préférable d'utiliser la canalisation d'eau intérieure aux conditions suivantes (selon C 15-100 § 542.3) :

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Elle devra être reliée à une prise de terre réalisée dans le sous-sol de la construction.
– La continuité électrique de l'ensemble de la canalisation devra être respectée.
– En aval du compteur d'eau, un manchon isolant peut-être utilisé pour éviter le contact simultané entre le corps humain et les canalisations en amont et en aval du manchon isolant. Il devra avoir de 2 m de longueur ou plus, pour être efficace.
– La canalisation intérieure devra être repérée de façon à indiquer clairement, près du compteur d'eau, qu'elle est utilisée comme conducteur de terre.

5.6 Mise à la terre des équipements électroniques et informatiques

Le conducteur de terre lorsqu'il atteint une certaine longueur, présente une impédance qui augmente avec la fréquence et constitue une antenne qui capte les rayonnements électromagnétiques ambiants et réinjecte dans l'installation le courant perturbateur résultant.

Dans les installations qui traitent des données quelquefois très confidentielles, le conducteur de terre véhicule les signaux parasites compromettants et se comporte également comme une antenne.

Certaines configurations (installations radar, émetteurs de puissance, centres de calculs, ambassades…) nécessitent le blindage impératif du conducteur de terre.

Dans certains cas extrêmes il faudra veiller à la position du puits de terre par rapport aux appareillages sensibles et quelquefois filtrer ce conducteur.

5.7 Mesure de résistivité des sols

5.7.1 Rappels

La mesure de résistivité des sols se justifie lorsqu'il est possible de choisir l'emplacement d'un réseau de terre sur un terrain en construction, et lorsque les risques d'obtenir une terre de qualité médiocre sont grands.

Pour des maisons particulières il est rare que cette mesure soit requise, compte tenu de la faible latitude pour l'implantation de la prise de terre.

Pour des bâtiments tertiaires industriels de grande envergure, ou par exemple pour des postes de distribution d'énergie, il en va tout autrement. La mesure de résistivité permet alors de choisir avec exactitude le meilleur emplacement pour les prises de terre, ce qui peut éviter des complications, des pertes de temps, donc d'argent, lors de la construction du bâtiment, mais aussi des problèmes ultérieurs dus à une terre de mauvaise qualité.

Connaître le profil de la résistivité du sol suivant la profondeur permet donc de choisir l'emplacement des prises de terre et de prévoir les caractéristiques électriques du réseau de terre.

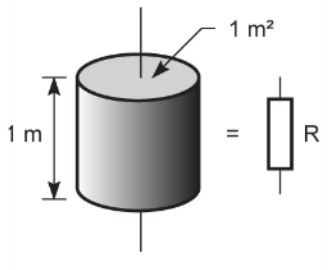
Diverses méthodes sont utilisées pour déterminer la résistivité d'un terrain. Mentionnons rapidement le prélèvement d'échantillons et la méthode des « deux électrodes »

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

qui ne fournissent que des indications très locales et par conséquent insuffisantes, voire trompeuses, pour la conception des prises de terre.

On utilise parfois la mesure de la résistance de terre d'une électrode de forme connue (piquet, par exemple) pour déterminer la résistivité du terrain qui l'entoure. Cette méthode a l'avantage de fournir une mesure globale, mais elle ne s'applique bien que si la prise de terre à implanter est de dimensions comparables à celles de l'électrode utilisée comme référence.

La méthode la plus utilisée pour déterminer la résistivité du sol est celle des « quatre électrodes » dite méthode de Wenner.



La résistivité (ρ) d'un terrain s'exprime en ohm.mètre (Ω.m)
Ceci correspond à la résistance théorique en ohm d'un cylindre de terre de 1 m² de section et de 1 m de longueur.
La résistivité est très variable selon les régions et la nature des sols car elle dépend du taux d'humidité et de la température (le gel ou la sécheresse l'augmentent).

Figure 5.9 – Notion de résistivité de terrain.

Tableau 5.5 – Synthèse des différentes méthodes de mesures en fonction des lieux et des types d'installations.

Méthodes selon configuration	Bâtiment à la campagne avec possibilités de planter des piquets	Bâtiment en milieu urbain sans possibilités de planter des piquets	Réseaux de terre multiples en parallèle
Méthode des 62 %	x		
Méthode en triangle	x		
Méthode variante des 62 %	x	x	x
Mesure de boucle phase-PE	x	x	
Pince de terre			x

5.7.2 Méthode des « quatre électrodes » autre que la méthode de Wenner

■ Principe de mesure

Pour connaître à l'aplomb d'un point O la résistivité du sol en fonction de la profondeur, on fait circuler à l'aide d'un générateur G un courant *I* entre deux prises de terre ponctuelles H et E (*figure 5.10*).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

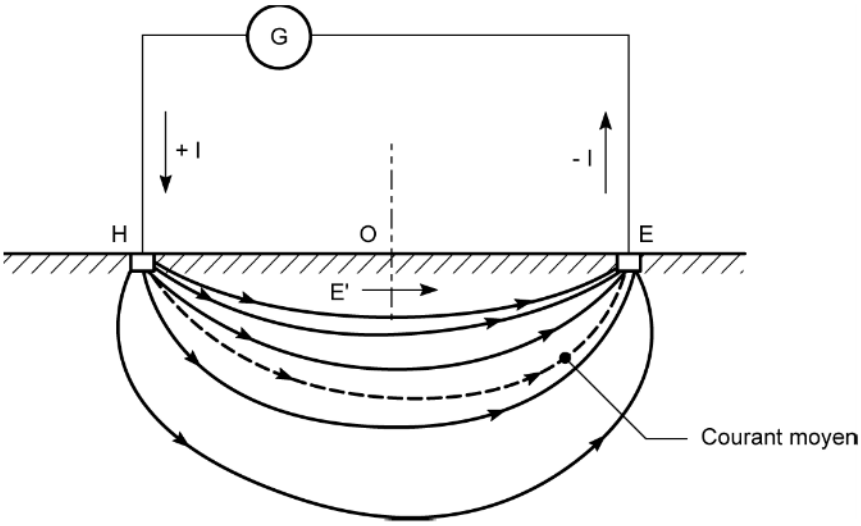


Figure 5.10 – Principe de mesure.

En sol homogène de résistivité *r*, la valeur du champ électrique *E'* au point O qui est dû à la présence des charges électriques de signes contraires venant de H et de E, a pour valeur :

$$E' = \frac{\rho}{2\pi}\left[\frac{(+1)}{HO^2} - \frac{(-1)}{OE^2}\right]$$

Si le point O est situé au milieu de *HE*, tel que $HO = OE = d$, on en déduit la formule suivante de la résistivité du sol sous le point 0 :

$$\boxed{\rho = \pi d^2 \frac{E'}{I}}$$

Le sol étant rarement homogène, la formule exprime la résistivité apparente des couches cumulées du sol sous le point O jusqu'à la profondeur atteinte par le filet de courant moyen circulant entre les électrodes H et E.

En pratique, on détermine le champ électrique *E'* en faisant le rapport entre la différence de potentiel *DV*, qui existe entre deux électrodes de terre S et E_S disposées symétriquement par rapport à O, et leur écartement *a* (*figure 5.11*).

$$E' = \Delta V / a$$

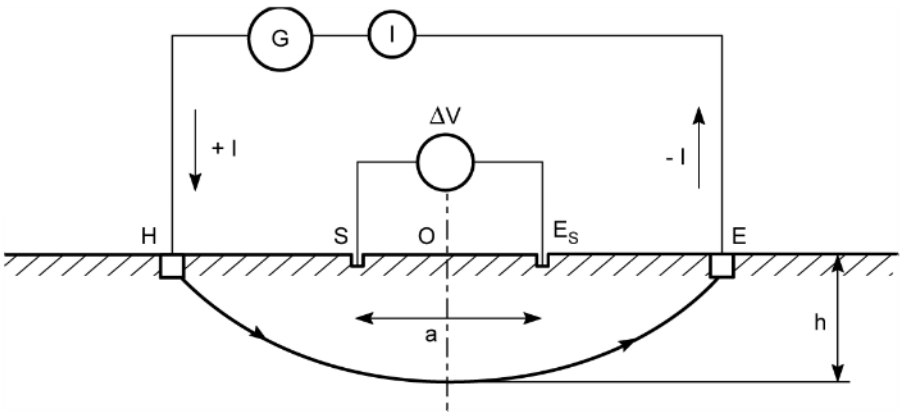


Figure 5.11 – Méthode des « quatre électrodes ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

La différence de potentiel DV peut être exprimée en fonction de la distance respective des points S et E_S par rapport aux courants + *I* et – *I*.
On obtient la relation suivante :

$$\Delta V = V_C - V_D = \frac{a.I}{2\pi}\left[\left(\frac{1}{HS} - \frac{1}{SE}\right) - \left(\frac{1}{HE_S} - \frac{1}{E_S E}\right)\right]$$

On en déduit la valeur de la résistivité apparente ρ des couches cumulées du sol sous le point O :

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{HS} - \frac{1}{SE} - \frac{1}{HE_S} + \frac{1}{E_S E}} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

C'est la formule générale pour la mesure de la résistivité apparente des sols, quelle que soit la longueur des segments en négligeant l'enfoncement des piquets dans le sol. Le terme *V*/*I* est la résistance *R* qui est mesurée avec un ohmmètre de terre à quatre bornes dont le circuit voltmétrique est relié aux prises S et E_S et le circuit ampèremétrique aux prises H et E.
Dans le cas où le sol est homogène, la résistivité apparente est identique à la résistivité réelle.

5.7.3 Méthode de Wenner

La méthode de mesure de la résistivité apparente des sols la plus utilisée est celle de Wenner dans laquelle les quatre électrodes sont disposées en ligne et équidistantes.
L'appareil de mesure est un ohmmètre de terre classique. Les deux électrodes extrêmes sont celles d'injection du courant de mesure *I* ; les deux centrales sont les électrodes de mesure du potentiel *DV* (*figure 5.12*).
Le point O de mesure de la résistivité se trouve au milieu d'un système symétrique entre les électrodes de potentiel.
La distance *a* entre deux électrodes adjacentes est appelée « base de mesure » ; la distance entre les électrodes extrêmes est la « ligne d'émission » (elle est égale à 3*a* avec la méthode de Wenner).

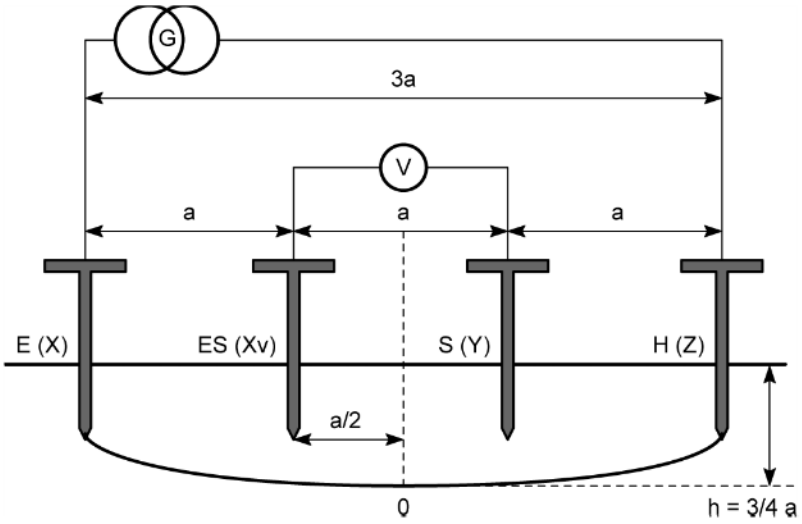


Figure 5.12 – Méthode de Wenner.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

La formule générale donnant la valeur de la résistivité apparente cumulée des couches de terrain situées sous le point de mesure se trouve simplifiée avec la méthode de Wenner. Elle devient :

$$\rho = 2\pi . a . R$$

avec ρ la résistivité apparente cumulée en Ω.m, *a* la base de mesure en m et *R* la valeur en Ω, lue sur l'ohmmètre de terre.

Notion de profondeur d'investigation

À l'aplomb des deux électrodes centrales (mesure du potentiel), la densité de courant dans le sol décroît régulièrement lorsque la profondeur augmente. Le courant pénètre d'autant plus profondément dans le sol que les électrodes d'injection du courant sont éloignées.

La résistivité apparente mesurée par la méthode de Wenner est donc une moyenne des résistivités réelles du terrain, chaque valeur étant pondérée par la densité de courant à la profondeur considérée.

En pratique, on peut admettre que la résistivité apparente est essentiellement celle des couches comprises entre la surface du sol et la profondeur à laquelle la densité de courant n'a que la moitié de sa valeur en surface.

En sol homogène, la résistivité ($\rho = 2\pi . a . R$) mesurée est celle du point situé sous le point O à une profondeur :

$$h = 3/4\ a = 0{,}75\ a$$

La mesure de ρ est donc tridimensionnelle, et un terrain pourra très bien avoir différentes résistivités au même endroit, mais à différentes profondeurs.

5.8 Mesures de terre

5.8.1 Mesure de terre avec deux piquets auxiliaires

Principe de mesure

A étant la prise de terre à mesurer (*figure 5.13*), on fait circuler, à l'aide d'un générateur approprié G, un courant alternatif (*i*) constant à travers la prise auxiliaire C(H) dite « prise d'injection courant », le retour se réalisant par la prise de terre A(E).

On mesure la tension *V* entre la prise A(E) et le point du sol où le potentiel est nul au moyen d'une autre prise auxiliaire P(S) dite « prise de potentiel 0 volt ».

La tension *V* est mesurée après un redressement, synchronisé avec le générateur G, de façon à éliminer l'influence des courants parasites alternatifs.

Le quotient de la tension *V*, ainsi mesuré par le courant constant injecté (*i*), donne la résistance recherchée.

La fréquence du générateur de courant doit être choisie en dehors de celle du secteur et de ses harmoniques (une valeur de 120 ou 225 Hz est bien adaptée aux cas généraux).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5 1° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

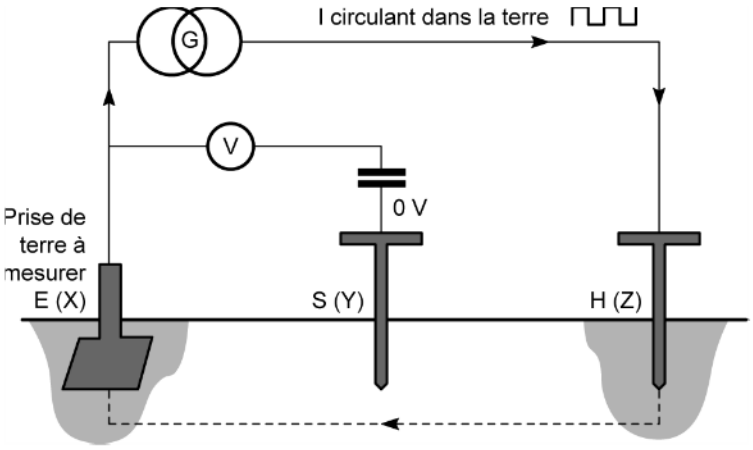


Figure 5.13 – Méthode de mesure de terre avec deux piquets auxiliaires.

Pour permettre de rendre les appareils de mesure de terre pratiquement insensibles aux courants telluriques, un condensateur en série avec la prise Y « bloque » les composantes continues.

Des filtres sélectifs (50 Hz) atténuent l'influence des composantes alternatives « secteur » circulant dans les sols.

■ Méthode de mesure de terre en ligne dite « des 62 % »

La mesure de la résistance d'une prise de terre nécessite l'emploi de deux électrodes auxiliaires (injection de courant et référence de potentiel 0 volt).

La position des deux électrodes auxiliaires, par rapport à la prise de terre à mesurer, est déterminante pour effectuer une bonne mesure de façon à sortir des zones d'influences des terres, comme nous venons de le voir précédemment.

Seuls des calculs complexes, à partir de cartes de résistivité des sols, permettraient de déterminer cette distance. Toutefois, il existe des méthodes empiriques qui permettent de guider l'opérateur pour positionner correctement ces électrodes.

Pour des distances très grandes entre les prises E et H, la courbe fournissant le relevé des différences de potentiel *VS* – *VE* le long de la droite EH aurait l'allure indiquée sur la *figure 5.13* avec un point d'inflexion à pente nulle dans la zone correspondant à la terre de référence.

Des statistiques de terrain ont montré que la méthode idéale pour garantir la plus grande précision de mesure consiste à placer le piquet de référence S à 62 % de E sur la droite EH (point « a » de la *figure 5.14*).

Il convient ensuite de s'assurer en déplaçant le piquet S en S′ et S″ (c'est-à-dire de ± 10 %) de part et d'autre de sa position initiale sur la droite EH, que la mesure varie peu. Dans le cas contraire, augmenter la distance *EH* (car le piquet S est planté dans une zone influencée par E et/ou par H).

Les *figures 5.15 et 5.16* permettent de guider l'utilisateur en définissant :

– pour une prise de terre constituée par un piquet, la valeur du rayon *rH* de la prise hémisphérique équivalente ;
– les distances *XY* et *XZ* à prévoir pour les prises auxiliaires en fonction du rayon de la prise hémisphérique équivalente.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

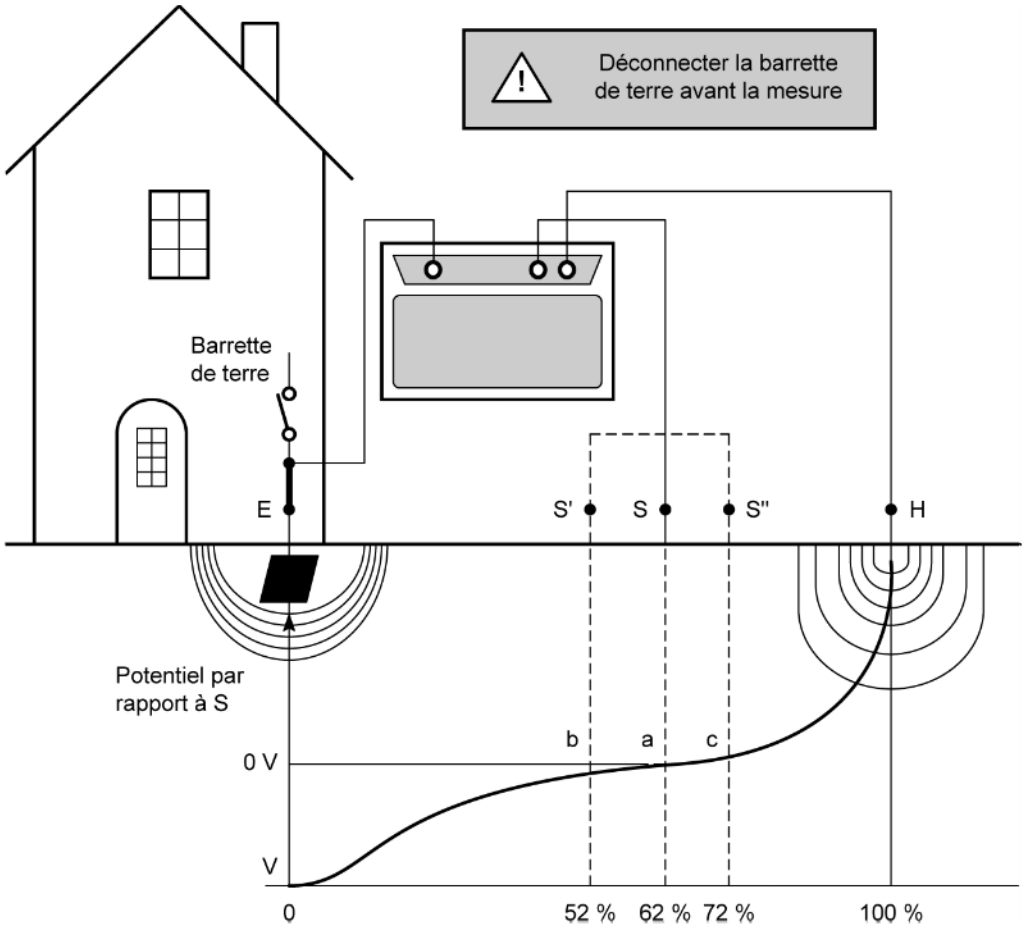


Figure 5.14 – Méthode de mesure en ligne dite « des 62 % ».

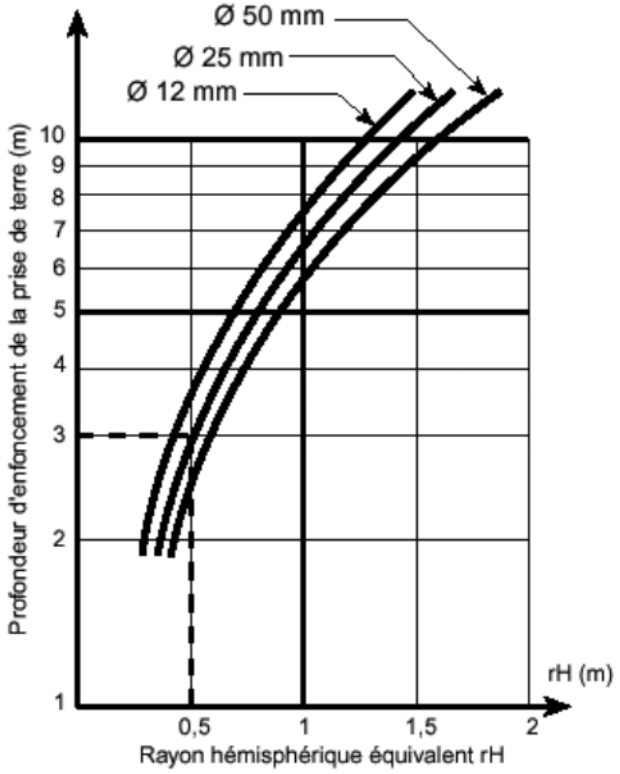


Figure 5.15 – Enfoncement piquet = *f*(*rH*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

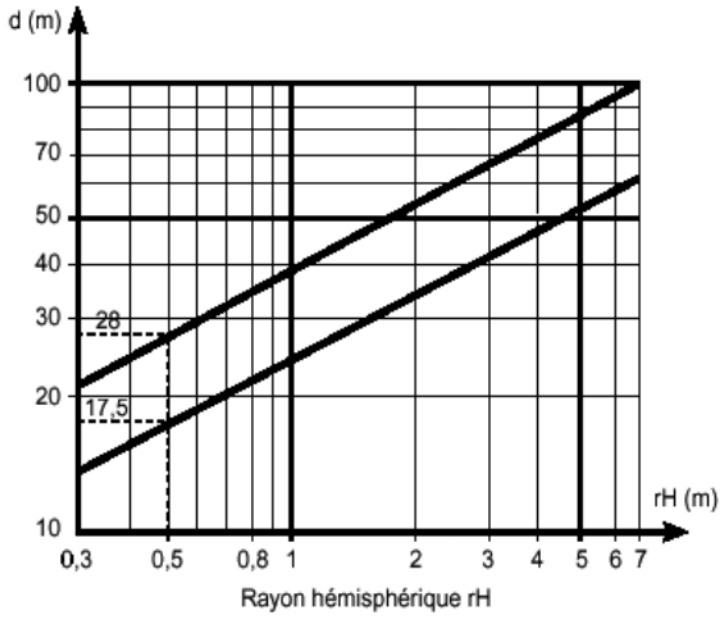


Figure 5.16 – Distances *XY* et *XZ* = *f*(*rH*).

Exemple : un piquet de terre de 25 mm de diamètre enfoncé à 3 m de profondeur donne un rayon de 0,50 m, ce qui correspond à des distances minimales devant séparer respectivement les électrodes de courant et de potentiel de la prise de terre de 28 et 17,5 m.

■ Méthode de mesure de terre en triangle

Lorsque la méthode décrite précédemment n'est pas réalisable (impossibilité d'alignement ou obstacle interdisant un éloignement suffisant de H), on peut effectuer une mesure en triangle (*figure 5.17*). Cette méthode ne doit pas être considérée comme une méthode de référence, car sa précision laisse à désirer par rapport à la méthode des 62 %.

– La prise de terre E et les piquets S et H forment un triangle équilatéral (si possible).
– Effectuer une première mesure en plaçant le piquet S en A, puis une deuxième en le plaçant en B, et comparer les valeurs ainsi obtenues.

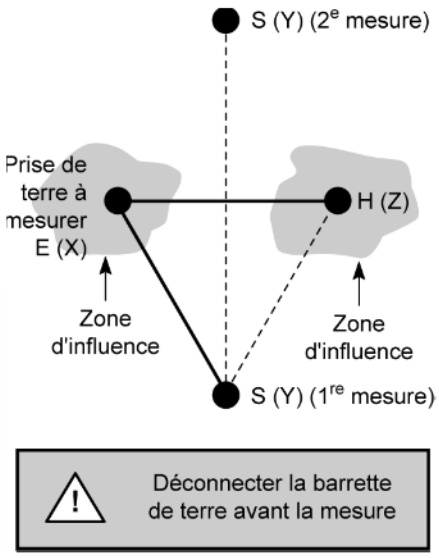


Figure 5.17 – Méthode de mesure en triangle.

Si les valeurs trouvées sont très différentes, le piquet S est dans une zone d'influence ; il faut alors éloigner considérablement les piquets H et S et recommencer les mesures.

Si les valeurs trouvées sont voisines, à quelques % près, la mesure est considérée comme bonne.

Toutefois, cette méthode fournit des résultats incertains ; en effet, même lorsque les valeurs trouvées en A et B sont voisines, les zones d'influences peuvent se chevaucher.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

5.8.2 Mesure de terre avec un seul piquet auxiliaire

Le principe de mesure reste le même que pour la méthode des 62 % : injection d'un courant entre les piquets E et H (*figure 5.18*), et mesure de la tension entre les piquets E et S (situé dans la zone neutre dite « terre de référence 0 V »).
Le quotient de la tension mesurée sur le courant injecté donne la résistance de terre.
Les différences avec la méthode des 62 % sont :

– Alimentation de la mesure à partir du réseau, contrairement aux ohmmètres de terre classiques qui sont autonomes et génèrent le courant de mesure à partir de piles ou batteries.
– Un seul piquet auxiliaire est nécessaire (piquet S), ce qui rend plus rapide la préparation de la mesure. En effet, le piquet H est constitué par la mise à la terre du transformateur de distribution.
– Il n'est plus nécessaire de déconnecter la barrette de terre du bâtiment, comme avec les ohmmètres de terre traditionnels. C'est un gain de temps et cela garantit le maintien de la sécurité de l'installation pendant la mesure.

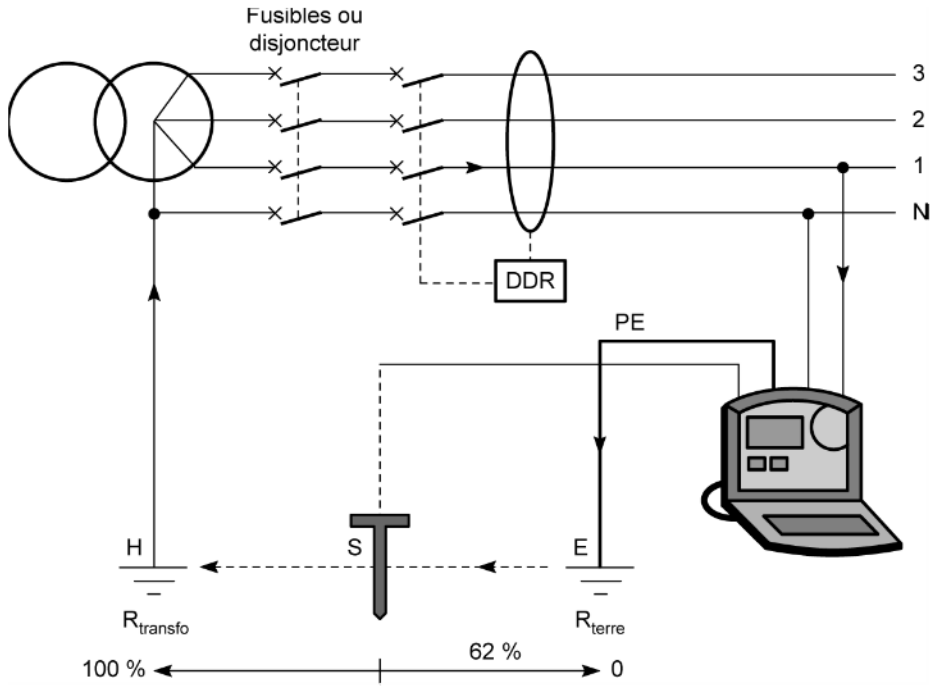


Figure 5.18 – Variante de la méthode des 62 % (un piquet).

5.8.3 Mesure de terre sans piquet auxiliaire

■ Ohmmètre de boucle

La mesure de résistance de terre en ville s'avère souvent difficile par la méthode des deux piquets auxiliaires : impossibilité d'implanter des piquets faute de place, sols bétonnés…
La norme NFC 15-100 considère que la valeur de la résistance de boucle peut être prise en compte à la place de la résistance de terre, pour satisfaire aux règles concernant la protection contre le risque des contacts.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus au termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

En fait, la résistance de la prise de terre des masses constitue, en général, la partie la plus importante de la résistance de la boucle de défaut (*figure 5.19*), car la terre du neutre et la résistance des câbles incluses dans la mesure sont négligeables.

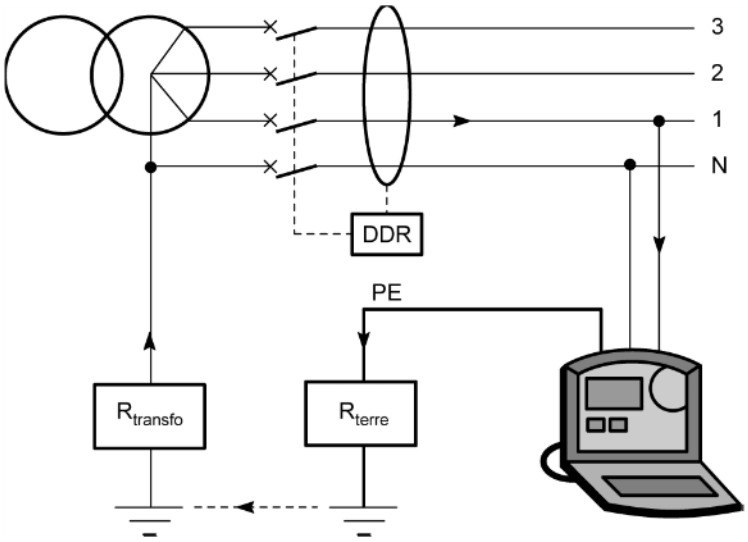


Figure 5.19 – Mesure de terre sans piquet auxiliaire.

L'avantage majeur de cette méthode est la facilité de mise en œuvre.
Brancher l'ohmmètre de boucle sur une prise secteur 230 V (prise normalisée 2 pôles + terre), appuyer sur le bouton de test : la mesure est faite.
Pour bien appliquer cette méthode, il faut connaître le domaine exact d'application. Ce type d'appareil ne donne la valeur de terre que sur une installation TT (neutre relié à la terre, masses reliées à une autre terre). L'erreur de mesure (par excès) introduite par cette méthode va dans le sens d'une sécurité accrue.

■ Pince de terre (voir *figure 5.26*)

Certaines installations électriques disposent de multiples mises à la terre en parallèle. C'est vrai dans certains pays du monde où la terre est « distribuée » chez chaque usager par le fournisseur d'énergie.
Dans les établissements équipés de matériels électroniques sensibles, un maillage des conducteurs de terre reliés à des terres multiples permet d'obtenir un plan de masse sans défaut d'équipotentialité.
Pour ce genre de réseau, il est possible d'optimiser la sécurité et la rapidité des contrôles au moyen d'une pince de terre.
Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'isoler l'installation (par ouverture de la barrette de terre), ni de planter des piquets.
Un simple enserrage du câble relié à la terre permet de connaître la valeur de la terre ainsi que la valeur des courants qui y circulent.
Un schéma théorique de ces types de réseaux est représenté *figures 5.20* et *5.21*.
Si l'enroulement « générateur » de la pince développe une tension alternative de niveau constant E autour du conducteur enserré, un courant $I = E/R$ boucle circule à travers la boucle résistive.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

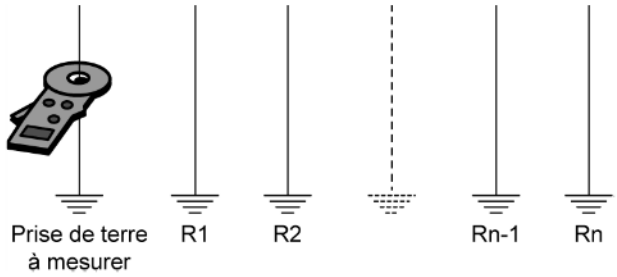


Figure 5.20 – Schéma théorique.

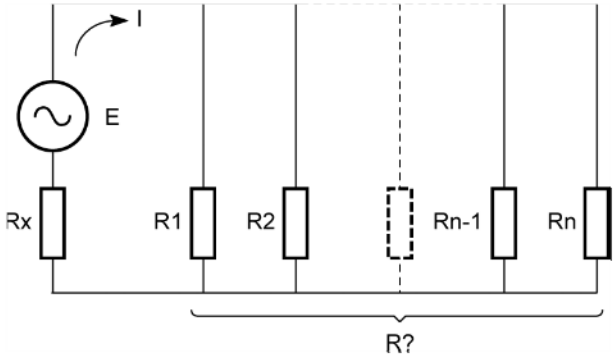


Figure 5.21 – Schéma équivalent.

Ce courant est alors mesuré grâce à l'enroulement « récepteur » de la pince.
Connaissant *E* et *I*, la résistance de boucle est ensuite calculée puis affichée.
L'ensemble de ces boucles de base forme un réseau étendu de terres, comme schématisé ci-dessus.
Sachant que *n* résistances en parallèle équivalent à une résistance *R*aux de valeur négligeable, on peut mesurer la valeur de la terre locale *Rx* :

R boucle = *Rx* + *R*aux (*R*aux résistance équivalente à *R*1… *Rn* en parallèle)

Comme *Rx* >> *R*aux, on obtient *R* boucle # *Rx*.
La pince de terre est utilisée pour les mesures de résistance de terre :

– au niveau des transformateurs MT/BT ;
– des bâtiments faradisés ;
– des lignes de télécommunication ;
– et pour la continuité des boucles à « fond de fouille »…

5.9 Mesures de boucle Phase-PE

5.9.1 Schéma TT

Cette mesure permet d'effectuer rapidement une mesure de terre en milieu urbain sans planter de piquet.
La mesure englobe la résistance de la terre, la résistance de terre du transformateur, la résistance interne du transformateur, la résistance du câble de terre.

1. Mesure de la tension *U* entre une phase et la terre locale.
2. On ferme l'interrupteur P qui provoque le passage d'un courant dans les terres *Rx* et *Ro*, la tension mesurée devient *U'*.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus au terme de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

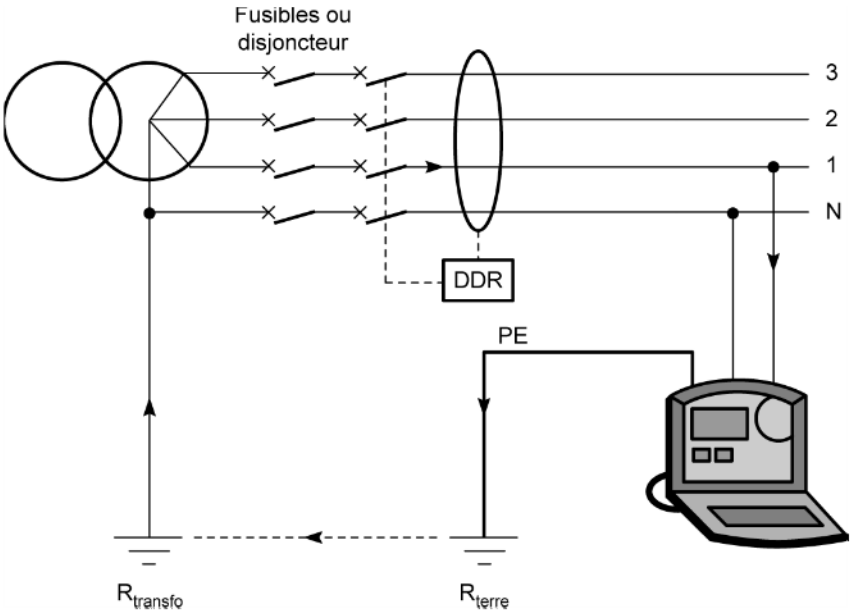


Figure 5.22 – Mesure de la terre rapide sans planter de piquet préconisée en milieu urbain.

D'où la relation :

$$Ro + Rx = \frac{U - U'}{U'} R$$

Cette mesure inclut donc, la terre à mesurer, la terre et la résistance interne du transformateur ainsi que la résistance des câbles. Toutes les résistances, hormis la résistance de terre, étant très faibles donc négligeables, la valeur mesurée est une valeur par **excès**, la valeur réelle de la terre étant inférieure. La valeur mesurée permet toutefois d'évaluer le courant débité en cas de défaut franc d'une phase à la terre et de savoir si le niveau est suffisant pour déclencher un disjoncteur différentiel.

5.9.2 Schéma TN

Dans le cas du SLT TN, la mesure de boucle de Phase-PE fournit la résistance de la boucle de défaut. Il ne s'agit pas de la terre, mais cette mesure est intéressante car elle permet aussi de s'assurer que la tension de défaut ne dépassera pas 50 V ou 25 V.

5.9.3 Schéma IT

Dans le cas du SLT IT, la mesure de boucle de Phase-PE inclut la forte impédance de mise à la terre du transformateur. La mesure fournit donc la résistance de la boucle de premier défaut et non celle de la terre. Si le transformateur est isolé, la mesure est impossible.

5.10 Mesure de couplage

Le couplage entre deux terres peut engendrer des conséquences néfastes tant pour les personnes que pour les matériels.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Sur la *figure 5.23*, l'écoulement d'un courant de défaut par la masse M du réseau BTB peut provoquer une élévation du potentiel du sol et entraîner une augmentation du potentiel de la terre du neutre du réseau BTB et par conséquent mettre en danger la vie des personnes et des matériels utilisant le réseau BTB.

Lors d'un coup de foudre sur le transformateur HTA/BTB, l'élévation de potentiel instantané peut être de plusieurs kilovolts.

La méthode à employer est celle de la mesure en ligne dite « des 62 % ». La disposition des piquets auxiliaires : Z, retour du courant injecté dans la prise de terre et Y, qui figure la référence de potentiel doit être choisie de manière à assurer :

– un découplage suffisant avec la prise de terre à mesurer X, à condition de respecter les distances indiquées sur la *figure 5.23* ;
– la validité de la référence de potentiel du sol.

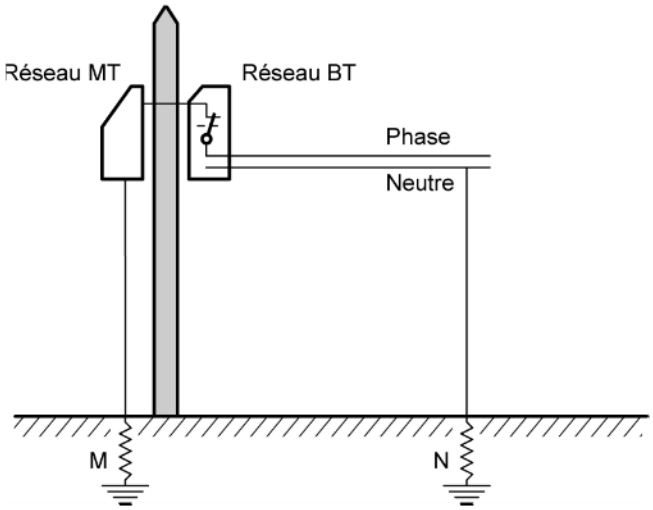


Figure 5.23 – Mesure de couplage entre deux terres.

La mesure de couplage s'effectue de la manière suivante :

1. Relier X et Xv à N à l'aide de 2 câbles de 50 m.
Relier Y au 1er piquet à l'aide d'un câble de 50 m.
Relier Z au 2e piquet à l'aide d'un câble de 100 m.
Placer le tellurohmmètre entre M et N à 20 m de leur axe.

- Effectuer la mesure de résistance de la prise de terre du neutre interconnecté qui doit être < 15 W.
- Ouvrir A (sauf s'il n'existe pas d'autre mise à la terre du neutre).
- Effectuer la mesure de résistance de la prise de terre du neutre déconnecté qui doit être < 60 W.
- Noter la valeur *RN* (résistance de la prise de terre du neutre déconnecté)[1].
- Laisser A ouvert durant la mesure.

1. L'ouverture du point A est nécessaire pour permettre la mesure de couplage de la première prise de terre du neutre.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

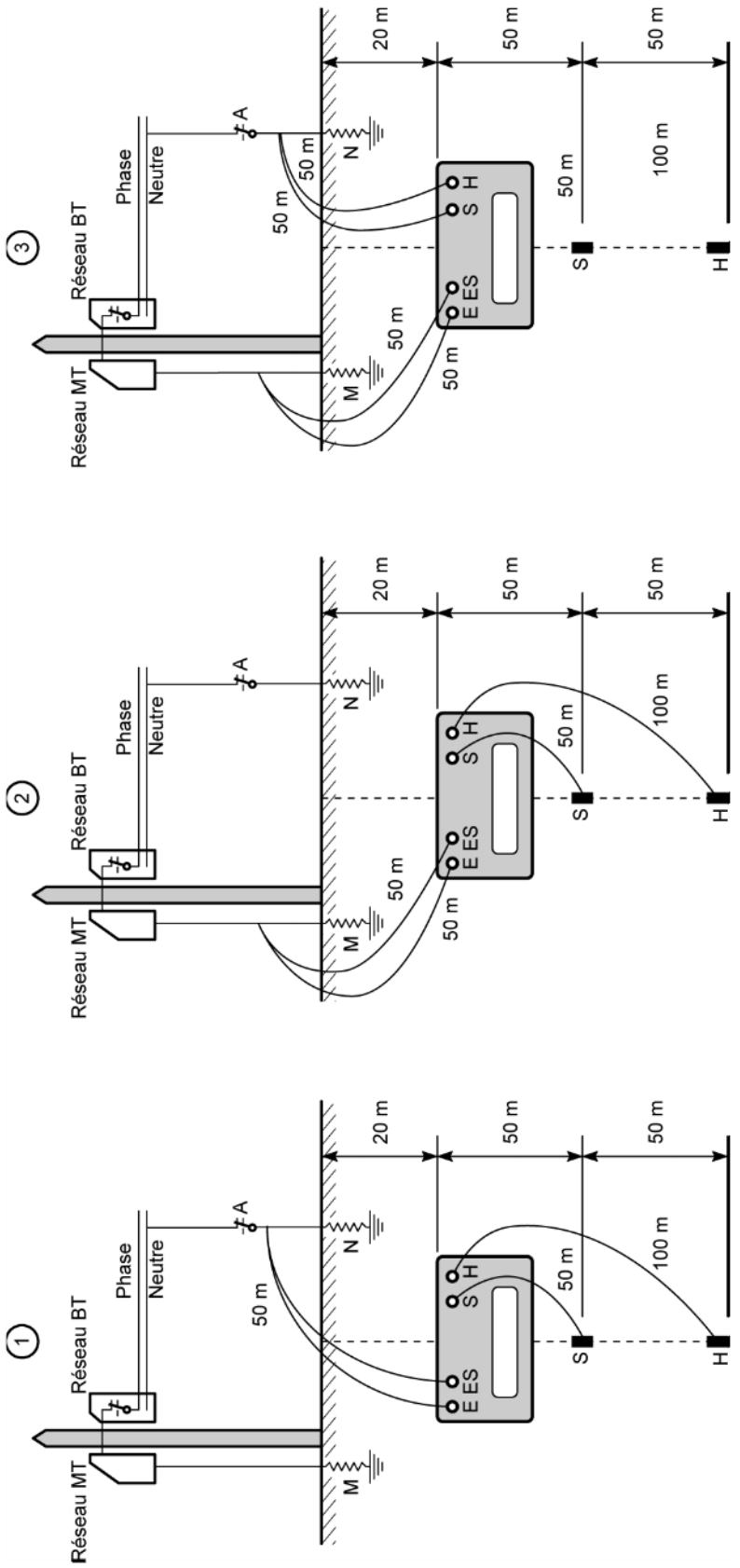


Figure 5.24 – Méthode de mesure de couplage.

2. Relier X et Xv à M à l'aide de deux câbles de 50 m.
Relier Y au 1er piquet à l'aide d'un câble de 50 m.
Relier Z au 2e piquet à l'aide d'un câble de 100 m.

- Effectuer la mesure de résistance de la prise de terre des masses qui doit être < 30 W.
- Noter la valeur *RM* (résistance de la prise de terre des masses).

3. Déconnecter les piquets Y et Z.
Relier X et Xv à M à l'aide de deux câbles de 50 m.
Relier Y et Z à N à l'aide de deux câbles de 50 m et 100 m.

- Effectuer la mesure *RMN*.
- Calculer le couplage :

$$RC = \frac{Rm + Rn - Rmn}{2}$$

- Calculer le coefficient de couplage :

$$k = \frac{RC}{RM} \text{ qui doit être inférieur à 0,15 (à EDF).}$$

5.11 Mesure de continuité

Cette mesure permet de vérifier la continuité des conducteurs de terre, qui assurent l'écoulement des courants de défaut.
La mesure de continuité vérifie la faible résistance des circuits de masse dans le but d'assurer une protection efficace.
La norme NFC 15-100, recommande de faire la mesure avec un courant de 200 mA sous une tension de 4 à 24 V.
La résistance du conducteur de masse doit être inférieure à 2 Ω.
La norme CEI/EN 61557 recommande de faire la moyenne de deux mesures successives obtenues en inversant les sens de circulation du courant.

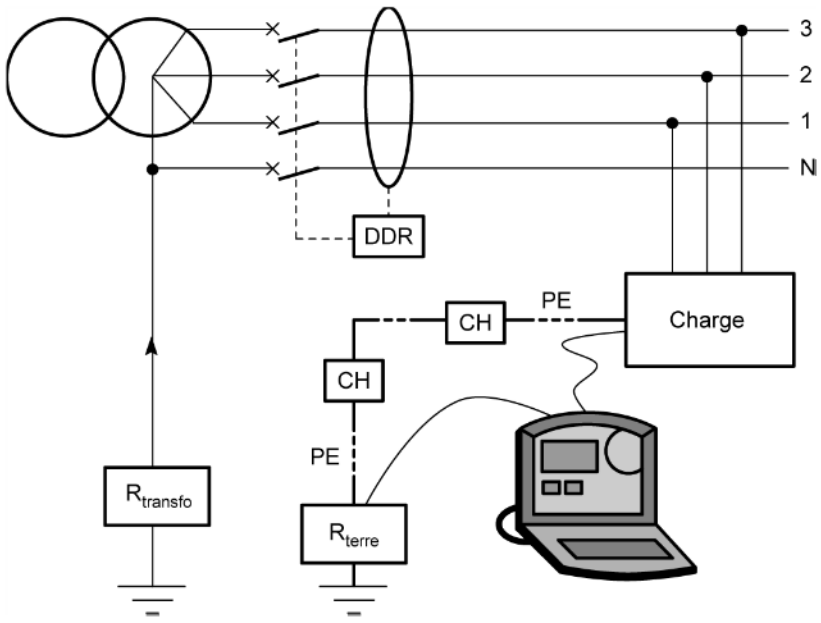


Figure 5.25 – Illustration d'une mesure de continuité.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Après avoir détaillé les méthodes de mesures de terre suivantes le milieu d'intervention, nous allons vous permettre par un organigramme de choix de pourvoir suivants vos besoins, d'utiliser le meilleur appareil.

Cet organigramme est orienté chez un constructeur leader dans le domaine et qui a activement participé à l'élaboration de ce chapitre.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

5.12 Choix d'un mesureur de terre

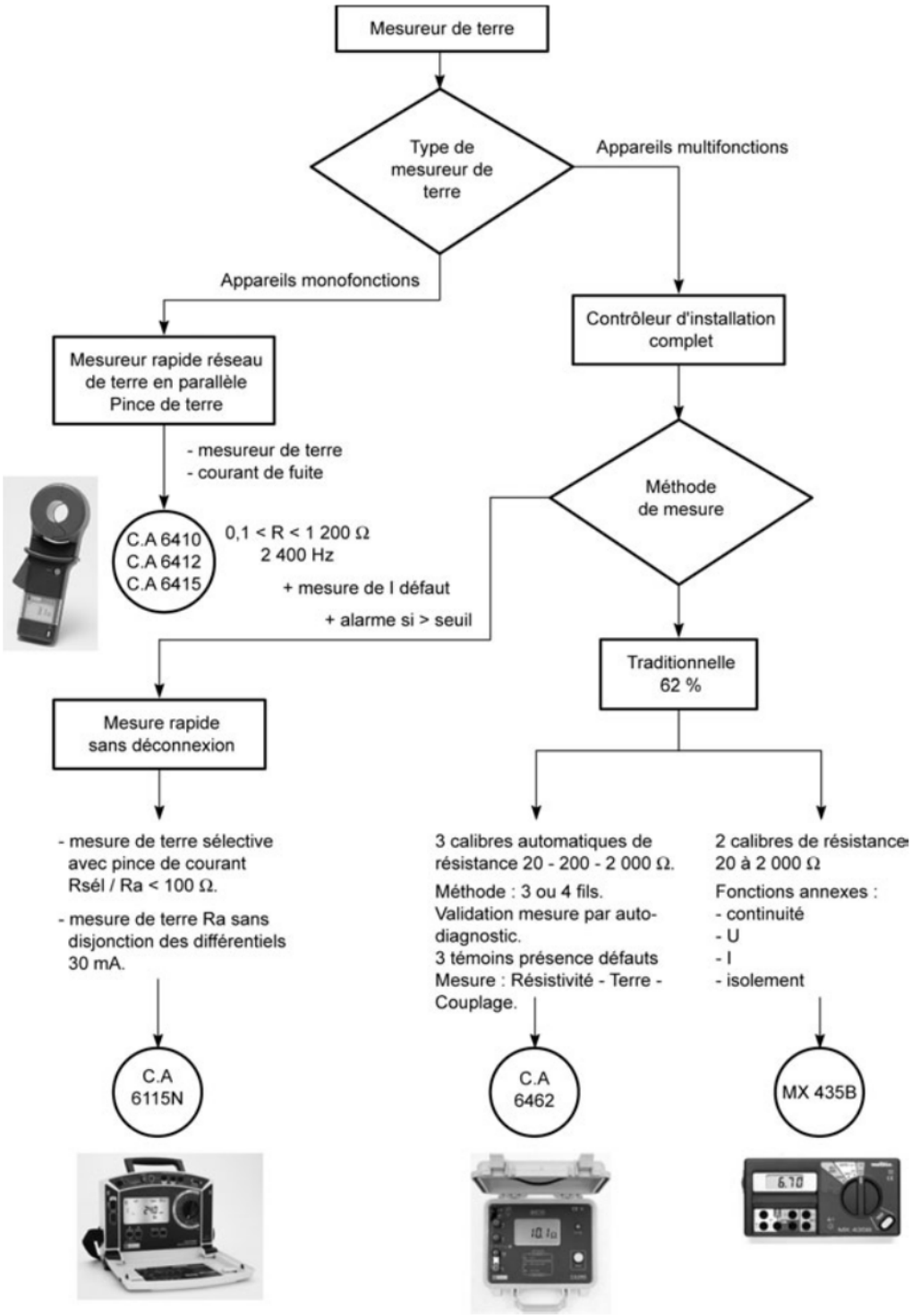


Figure 5.26 – Organigramme de choix d'un mesureur de terre.

Selon la configuration de l'installation à contrôler (zone urbaine, possibilité de planter des piquets, réseau de terre…), vous allez opter pour une méthode de mesure plutôt qu'une autre.
Vous trouverez sur le site web de Chauvin Arnoux les documentations techniques des appareils dédiés à la mesure de terre comme les appareils polyvalents intégrant cette mesure.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

6 • MESURE DE L'ISOLEMENT OU RÉSISTANCE D'ISOLEMENT

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Si les conducteurs électriques sont nécessairement présents dans les appareils et installations électriques, les isolants assurent la sécurité au même titre que leur rôle fonctionnel. La norme en vigueur impose la nécessité de mesurer fréquemment leur valeur.

Deux essais sont nécessaires pour valider la qualité d'un bon isolement :

– **Essai de tenue diélectrique** (appelé aussi essai de claquage) : est la valeur que peuvent supporter en tension (V ou kV) de moyenne durée sans que se produisent des amorçages entre conducteurs : réalisé en courant alternatif, la tension sera progressivement augmentée aux bornes des conducteurs, maintenue pendant 1 minute puis diminuée progressivement. Les appareils utilisés sont des diélectromètres (type MC5B, MC6). Cet essai est imposé par la NFC 20-040. Ce type de mesure est traité au chapitre 9, dans la partie qualimétrie.
– **Mesure de la valeur de la résistance de fuite ou résistance d'isolement** : la valeur doit être la plus forte possible en kΩ, MΩ, GΩ.

Cet essai est pratiqué à courant continu et ne va pas jusqu'à la destruction comme pour un essai de claquage (voir les conditions plus loin). Les appareils utilisés sont des contrôleurs d'isolement.

Nota : ces deux essais sont exigés lors de réception de matériel rénové ou neuf, mais en plus sa répétition périodique permet de suivre l'évolution du matériel et de prévenir tout défaut.

6.1 Rappels théoriques

6.1.1 Pourquoi mesurer l'isolement ?

Une baisse du niveau d'isolement implique un danger potentiel d'électrisation des personnes voire même d'électrocution ainsi que des risques d'incendie ou de court-circuit entraînant des dégradations des matériels.

La mesure de la résistance d'isolement permet : la sécurisation pour les personnes des installations et matériels électriques, la réduction de l'immobilisation des machines par un contrôle de leur vieillissement et l'assurance d'une maintenance préventive de qualité.

6.1.2 Qu'est-ce que la résistance d'isolement ?

Entre deux conducteurs électriquement distincts existe une résistance, normalement très élevée, appelée résistance d'isolement.

6.1.3 Buts de la mesure d'isolement

Dans un souci de sécurité, il est obligatoire de vérifier périodiquement les isolements d'une installation électrique.

Deux sortes de mesure sont exigées par la norme :

– la vérification de l'isolement des conducteurs entre eux (en particulier avant la mise sous tension d'une installation neuve) ;
– la vérification de l'isolement de l'ensemble de l'installation par rapport à la terre.

6.1.4 Isolements

La norme NFC 15-100 (section 621) indique : « *Les mesures d'isolement doivent être effectuées en courant continu, sous une tension de 500 V minimum.* »

On doit considérer la valeur de la résistance d'isolement pour toute l'installation si la longueur de l'ensemble des canalisations posées n'excède pas 100 m. Dans le cas contraire, la mesure doit être effectuée par tronçons de 100 m environ, appareils électriques branchés et contacteurs verrouillés, mécaniquement si nécessaire.

La valeur de la résistance d'isolement, ainsi définie, ne doit pas être inférieure à 1 000 Ω par volt de la tension installée et, dans tous les cas, ne doit pas être inférieure à 250 000 Ω.

L'isolement minimum pour une longueur de 100 m est à diviser par le rapport entre la longueur totale et 10 m.

Exemple : pour une longueur de 200 m, la valeur correspond à l'isolement minimum pour 100 m divisé par 2.

6.2 Mesure d'isolement par un appareil portatif

6.2.1 Mesure d'isolement par rapport à la terre

– Fractionner l'installation à vérifier en tronçons d'environ 100 m lorsque cela est possible.
– Isoler du réseau le tronçon à vérifier.
– S'assurer que tous les appareils sont connectés (interrupteurs fermés, appareils raccordés, protections du tableau de répartition fermées).
– Placer le commutateur de l'appareil sur le calibre *1 MΩ de la fonction isolement.*
– Le raccorder selon la *figure 6.1.*

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

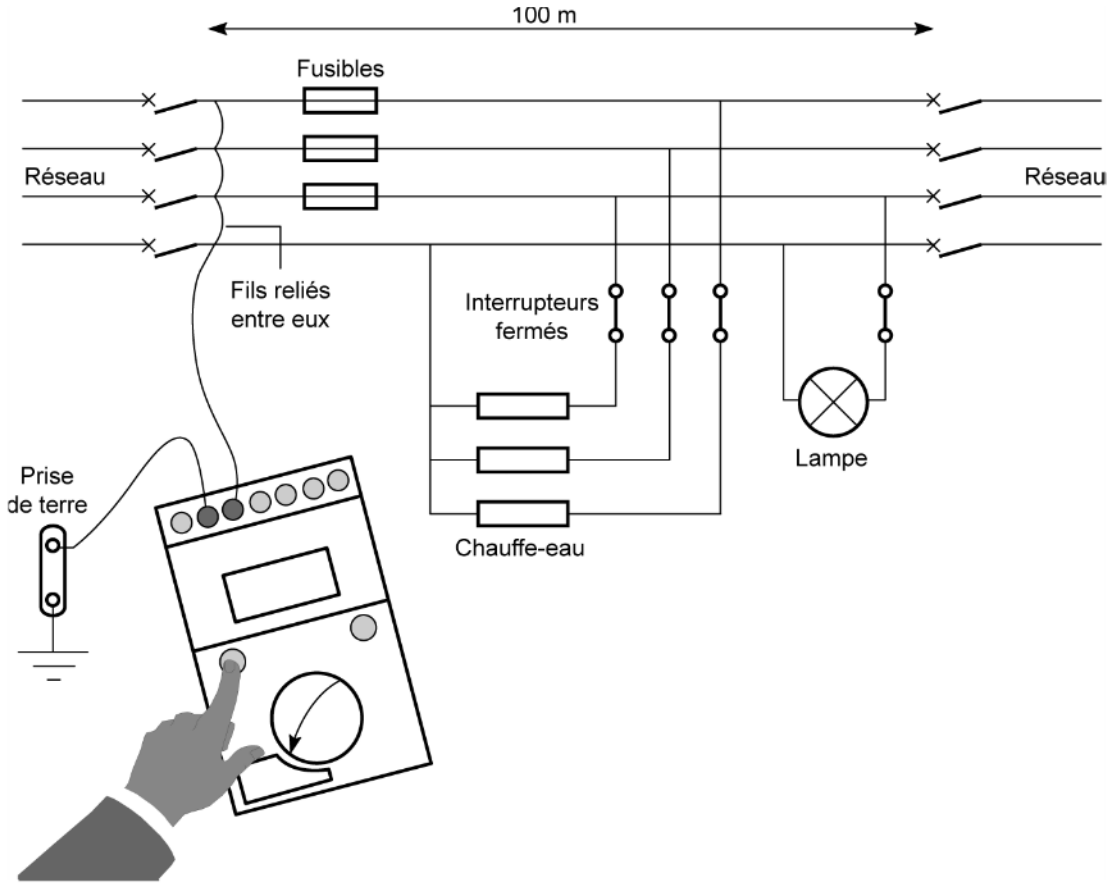


Figure 6.1 – Mesure de l'isolement par rapport à la terre.

6.2.2 Mesure d'isolement entre conducteurs

- Fractionner l'installation à vérifier en tronçons d'environ 100 m lorsque cela est possible.
- Isoler du réseau le tronçon à vérifier.
- S'assurer que tous les appareils sont déconnectés (interrupteurs fermés, appareils raccordés, protections du tableau de répartition fermées).
- Placer le commutateur sur le calibre *1 MΩ de la fonction isolement.*
- Raccorder l'appareil selon le schéma de la *figure 6.2.*
- *Vérifier l'absence de tension : le voyant de gauche (blanc) ne doit pas s'allumer ; sinon mettre le circuit hors tension.*
- Appuyer sur le poussoir Marche.
- Si nécessaire, changer de calibre.
- Lire l'isolement (en kΩ ou en MΩ).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

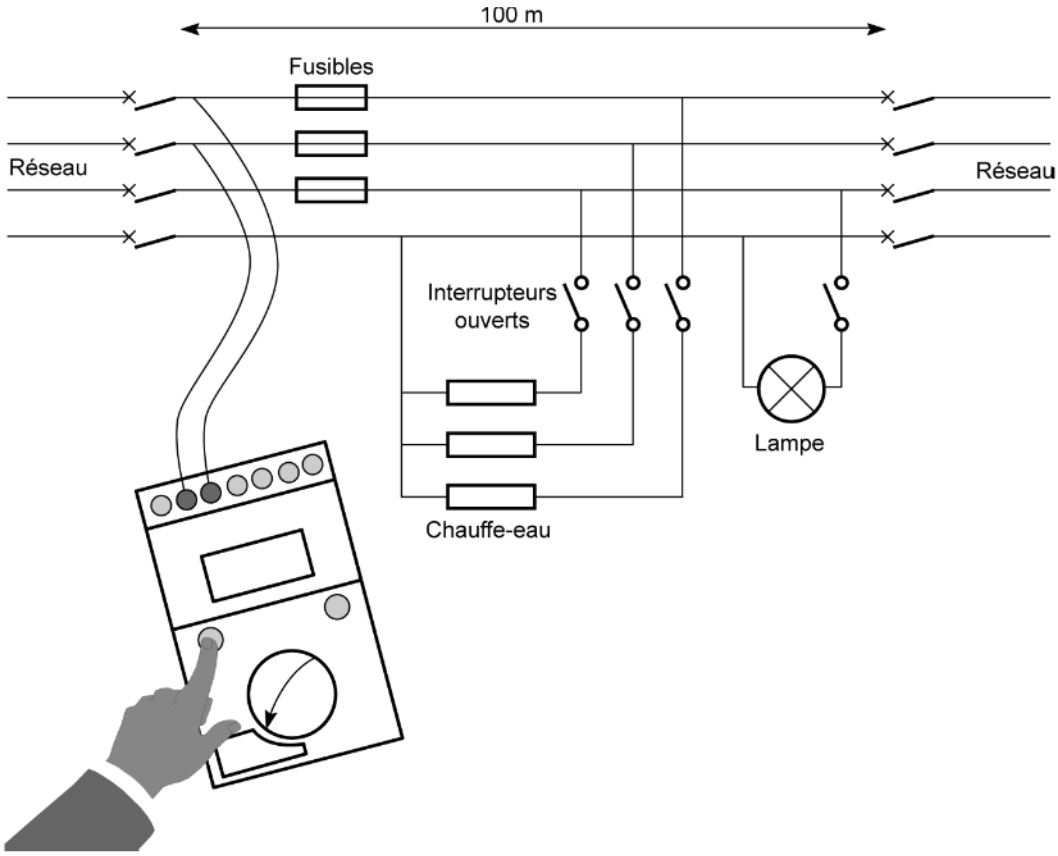


Figure 6.2 – Mesure de l'isolement entre conducteurs.

Figure 6.3 – Exemple de contrôle d'isolement sur un moteur asynchrone avec un contrôleur d'isolement de 50 V à 1 kV.

Modèle Chauvin Arnoux 6541-6543 : géré par logiciel, il permet de piloter des mesures ou de sortir les relevés et valeurs sur imprimante ou de les traiter sur tableur.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Applications

L'application principale est le contrôle systématique de tous les points d'une installation de distribution électrique BT dans des bâtiments domestiques, tertiaires et industriels opéré aussi bien par l'artisan électricien que par le personnel d'un organisme de contrôle.

Contrôle d'isolement : sous 250 V, 500 V et 1 000 V :

– des armoires électriques en vérifiant chaque disjoncteur, coupe-circuit, bornier de raccordement… ainsi que les différents départs ;
– des appareillages fixes : luminaires, néons, convecteurs électriques…
– des machines tournantes directement à partir du bornier de raccordement.

Résumé : il s'agit de vérifier la conformité ou la mise en conformité des installations électriques selon la NFC 15-100 (ou IEC 364 ou VDE 0413 ou BS 7671, selon les pays).

■ Méthodologie

Méthodologie des tests et mesures :

□ Test de l'isolement entre conducteurs

But : vérifier qu'aucun conducteur n'a subi de dommage lors de l'installation ou après une longue utilisation.
Méthode : la mesure est réalisée le récepteur déconnecté et l'installation hors tension.

□ Test de l'isolement de l'ensemble de l'installation par rapport à la terre

But : vérifier que tous les conducteurs sont isolés de la terre.
Méthode : la mesure est réalisée le récepteur connecté les conducteurs actifs reliés et l'installation hors tension.

Tableau 6.1 – Valeurs minimales exigées par la NFC 15-100.

Tension nominale de l'installation	Tension de test DC	Résistance d'isolement minimum
< 50 V	250 V	> 0,25 MΩ
de 50 V à 500 V	500 V	> 0,5 MΩ
de 500 V à 1 000 V	1 000 V	> 1 MΩ

Pour les câbles chauffants noyés dans les parois des bâtiments, l'isolement doit être > 0,25 MΩ pour une tension Un = 230 V et > 0,4 MΩ pour une tension Un = 400 V.
Précautions à prendre :

– Au-delà de 1 GΩ, l'influence des courants parasites à la surface d'un éventuel isolant entre les deux points de mesure fausse les résultats, on utilise alors un circuit appelé « de garde » permettant de sortir les courants parasites du circuit de mesure pour garantir la précision de mesure.

– Les variations de température et hygrométrie jouent sur la valeur de l'isolement.

Il faut noter le niveau de la température et HR lors de chaque relevé. L'isolement d'une machine tournante est divisé par deux pour chaque augmentation de température de 10 °C et inversement.

☐ Ratio de qualité d'isolement

La mesure d'isolement sur des éléments capacitifs ou inductifs (moteurs, longueurs de câbles…) est instable et demande trois courants différents lors du test :

– un courant capacitif qui s'annule dès la composante capacitive chargée ;
– un courant d'absorption diélectrique qui s'annule après le courant capacitif ;
– un courant de fuite constant seul représentatif de l'isolement.

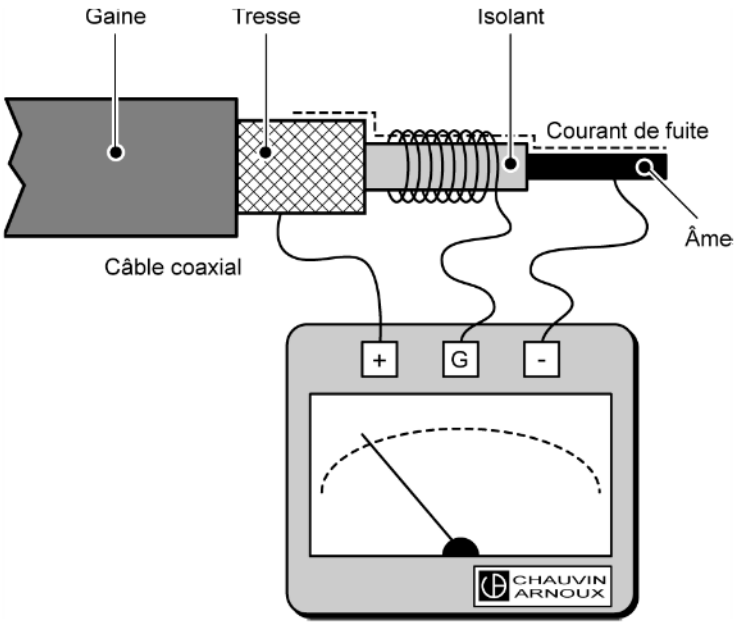


Figure 6.4 – Mesure d'isolement sur un câble.

La mesure sera donc perturbée au départ par ces courants parasites, cela implique que sa valeur va croître dans le temps.

Index de polarisation (noté P.I) = $R10$ mm/$R1$ mm

Si P.I > 4	excellent isolement
Si P.I = 2… 4	bon isolement
Si P.I = 1… 2	douteux
Si P.I < 1	danger

Ratio d'absorption diélectrique (noté DAR) = $R1$ mm/$R30$ s

Si $DAR > 1{,}25$	bon isolement
Si $DAR < 1{,}25$	mauvais

☐ Mesure d'isolement sous tension

Utilisation d'une pince de fuite : si I entrant = I sortant, la mesure indique 0, il n'y a aucun défaut d'isolement, si ce n'est pas le cas, on mesure le courant de fuite.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

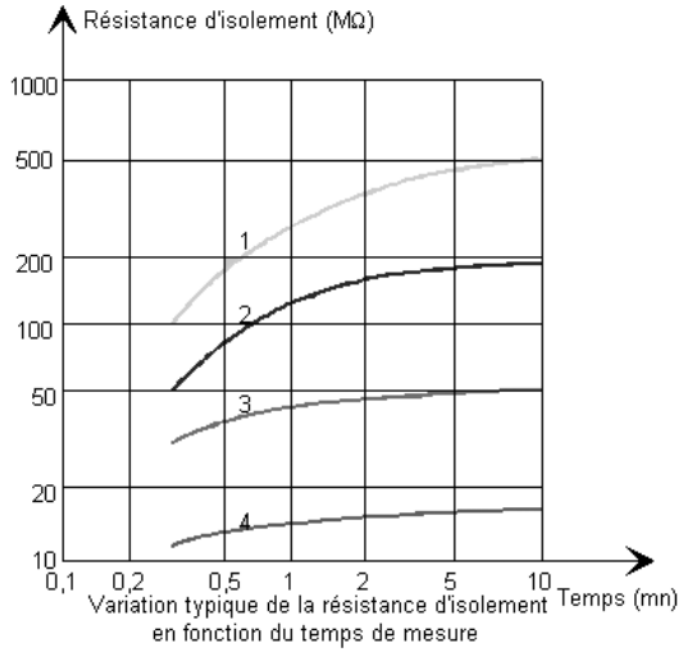


Figure 6.5 – Résistance d'isolement = *f* (temps de mesure).

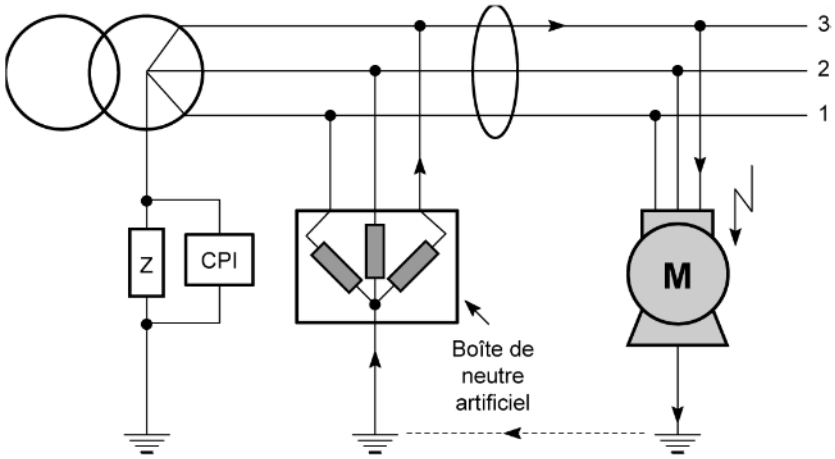


Figure 6.6 – Cas de l'installation en IT avec la boîte de neutre artificiel.

☐ **Synthèse : choisir son contrôleur d'isolement portatif**

Critères de choix :

- tensions d'essais (50-100-250-500-1 000-2 500-5 000 V DC) ;
- gamme de mesure en kΩ, MΩ, GΩ ;
- technologie utilisée (générateur statique, générateur à magnéto…) ;
- aspect métrologique (précision, confort de lecture…) ;
- appareils mono fonction ou multifonctions ;
- affichage analogique ou numérique.

D'autres critères importants à prendre en compte :

Fréquence d'utilisation

Dans le cas d'une utilisation peu fréquente ou sur un chantier extérieur ou à l'export, il est préférable d'opter pour un système à magnéto qui a pour avantage de toujours être prêt (sans piles) à l'emploi et robuste sur un chantier.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Dans le cas contraire, le système à générateur statique à piles assure un confort d'utilisation mais demande à surveiller l'autonomie d'un tel appareil.

Aspect métrologique

On choisira l'appareil avec un nombre d'échelle limité et logarithmique assurant une précision sur toute la gamme de mesure et non pas en fonction de l'étendue de l'échelle.

Nombre de fonctions

Le choix se portera sur un appareil mono ou multifonctions suivant l'utilisation à en faire.

Ergonomie et affichage

Les critères de forme et la résistance aux chocs ainsi que d'affichage numérique ou analogique peuvent être décisifs.

Problème rencontré

La mesure de résistance de terre par ohmmètre de boucle déclenche parfois le dispositif différentiel de l'installation. Pourquoi ?
La mesure de boucle à la terre consiste à placer pendant un temps très court une résistance entre une phase et la terre. En régime TT, le courant de défaut qui en résulte passe par la terre locale et remonte par la mise à la terre du neutre du transformateur EDF.
Ce courant permet le calcul de la valeur ohmique de la boucle. Il est normalement calibré pour ne pas faire déclencher les différentiels tout en permettant une précision de mesure suffisante. Lors de la mesure, de nombreux appareillages peuvent être branchés sur l'installation. Si ces appareils présentent de mauvais isolements, des courants de défaut circulent déjà dans la terre. L'informatique, et plus généralement tous les appareils qui contiennent de l'électronique (onduleurs, alimentations à découpage, télématique, domotique…) sont susceptibles de rejeter plusieurs milliampères de courants de défaut en vieillissant.
Ces courants viennent se superposer au courant de mesure. S'ils sont trop importants, ils peuvent par conséquent entraîner un déclenchement des différentiels 30 mA, par exemple. Avant une mesure de boucle de terre, il est donc toujours conseillé :

– au mieux, de vérifier la présence des courants de défaut existant dans l'installation avec une pince qui peut mesurer les faibles courants ;
– sinon, de débrancher les appareils ou au moins, de sauvegarder les données informatiques.

Solution : pour le concepteur de l'appareil de mesure, la solution consiste bien sûr à constamment réduire le courant de mesure des ohmmètres de boucle tout en gardant une précision suffisante, ce qui est un challenge ! À ce titre, Chauvin Arnoux vient de déposer un brevet sur une mesure de boucle sans disjonction des différentiels 30 mA, qui utilise un courant particulièrement faible.
Cette méthode a été adoptée sur le nouveau contrôleur d'installations électriques, le C.A 6115.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Vous trouverez sur le site web de Chauvin Arnoux et CATU les documentations techniques des appareils dédiés à la mesure d'isolement comme les appareils polyvalents intégrant cette mesure.

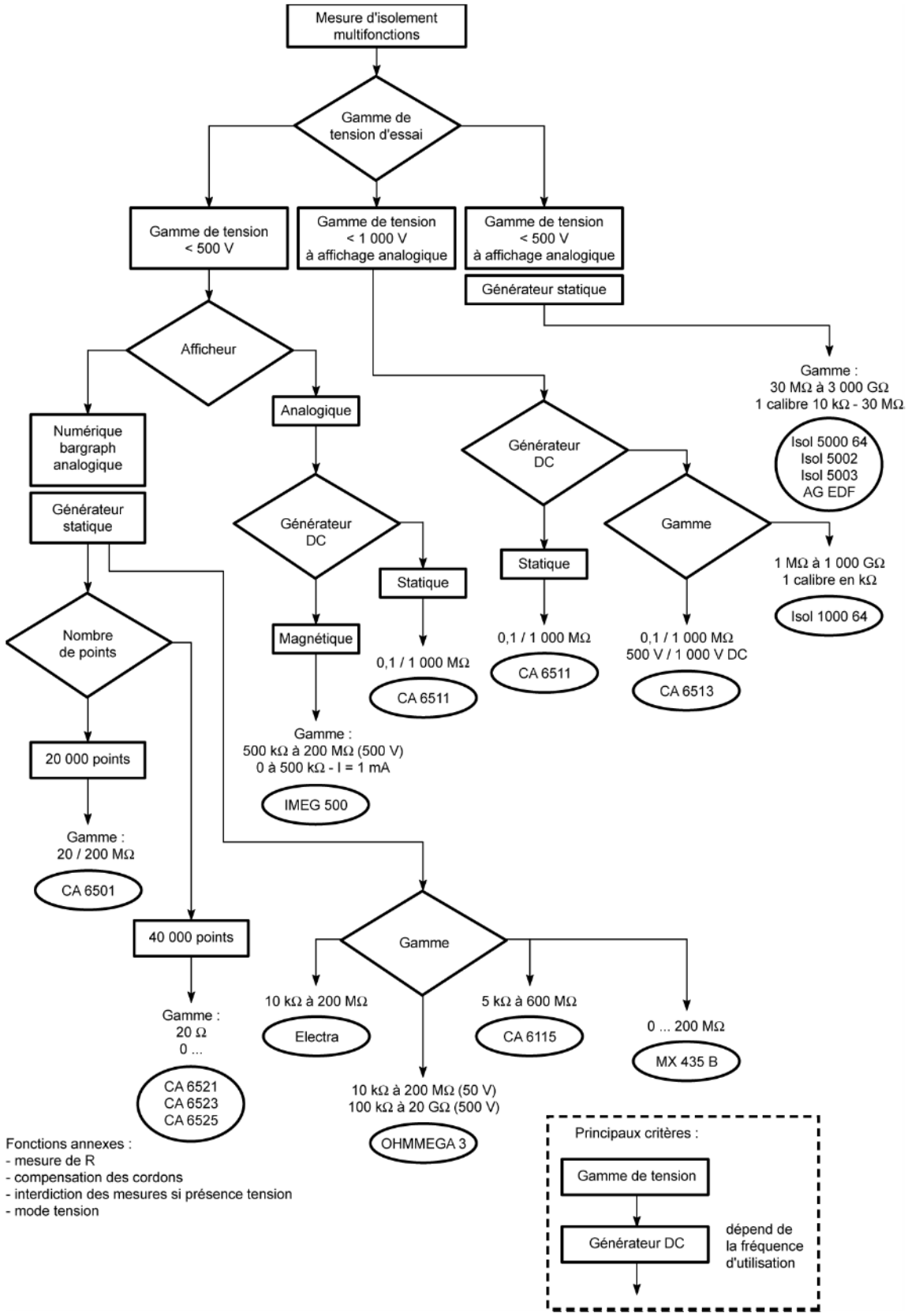


Figure 6.7 – Choix d'un contrôleur d'isolement multifonctions portatif.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

6.3 Contrôleur d'isolement fixe

6.3.1 CPI : contrôleur permanent d'isolement

Introduction

Les normes NFC 15-100 (§ 413.1.5.4), HD 384 CEI 364 imposent l'utilisation de CPI en régime IT.

Un contrôleur permanent d'isolement doit indiquer l'apparition d'un premier défaut d'isolement d'un conducteur actif sous tension à la masse en actionnant un signal sonore et/ou lumineux.

Principe de fonctionnement

La plupart des CPI injectent un courant de mesure dans la boucle formée par les conducteurs actifs et la terre (*figure 6.8*) une augmentation du courant de mesure traduit une baisse d'isolement du circuit. Le courant de mesure est comparé avec un seuil d'alarme des CPI.

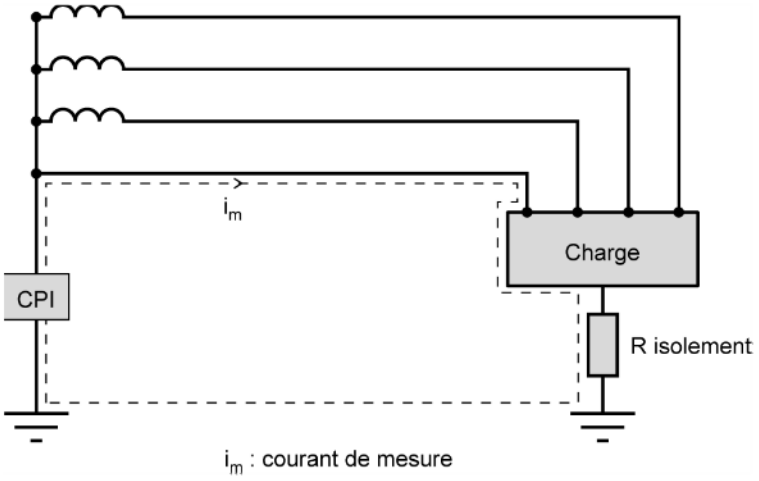


Figure 6.8 – Placement d'un CPI.

Le bon fonctionnement des CPI assure un courant de mesure peu élevé. L'impédance de 1 kΩ traditionnellement ajoutée entre le circuit et la terre (neutre impédant) est pratiquement inutile pour les CPI.

Définitions

Résistance d'isolement de l'installation électrique : c'est le niveau d'isolement de l'installation par rapport à la terre. Il doit être mesuré régulièrement par les organismes de contrôle et être supérieur aux valeurs de la norme NFC 15-100 (*tableau 6.2*).

Isolement des récepteurs : *Rf* = résistance de fuite

Rf moteur > 1 MΩ

Rf > *x* MΩ selon la norme produit

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 6.2 – Valeur minimale de la résistance d'isolement (NFC 15-100) hors tension.

Tension nominale du circuit (V)	Tension d'essai en courant continu (V)	Résistance d'isolement (MΩ)
TBTS et TBTP	250	≥ 0,25
≤ 500 V	500	≥ 0,5
> 500 V	1 000	≥ 1

Charge déformante : lorsque la charge n'est pas linéaire et impose un courant déformer par rapport à la tension ceci conduit à des valeurs du courant dans le neutre qui peuvent être très supérieures aux valeurs du courant de phase.

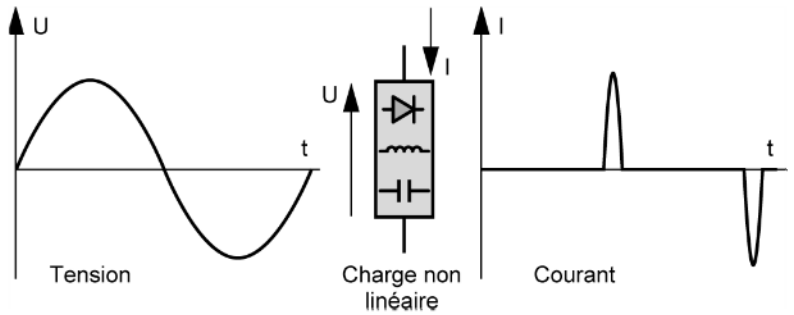


Figure 6.9 – Charge déformante.

Capacité de fuite d'un conducteur par rapport à la terre : lorsque deux conducteurs sont soumis à une différence de potentiel (tension), il présente entre eux un effet capacitif dépendant de leur forme, leur longueur, de l'isolant et de la distance qui les sépare.

Cette propriété physique a pour effet de provoquer un courant de fuite capacitif entre les conducteurs d'un réseau et la terre. Ce courant est d'autant plus important que le réseau est étendu.

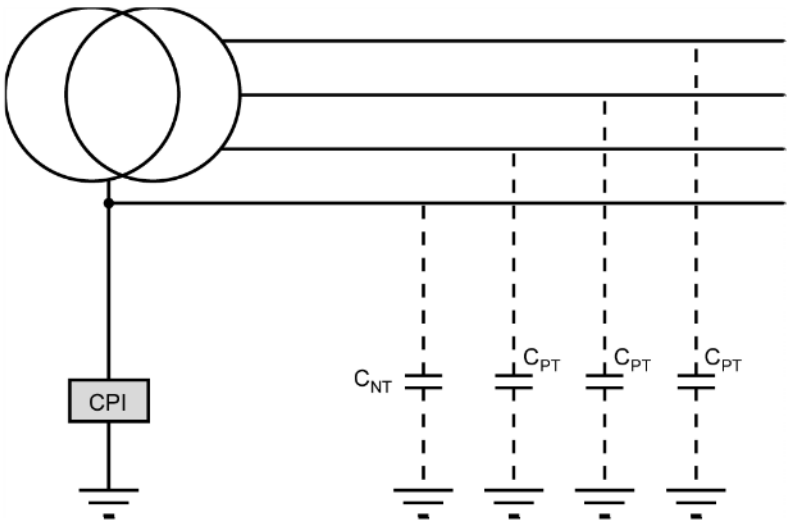


Figure 6.10 – Capacité de fuite à la terre.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Glossaire intégré : certaines définitions devront être maîtrisées pour la suite du chapitre.

Capacité maximale de fuite : c'est la somme de la capacité de fuite à la terre et de la capacité des condensateurs installés dans des matériels électroniques, informatiques. La capacité maximale de fuite est un paramètre important pour le choix d'un CPI. Il est à noter que la capacité globale de fuite a considérablement augmenté du fait des filtres CEM.

Réseau îloté : il est caractérisé par un récepteur unique ou des récepteurs de même type (moteurs, éclairage de sécurité…), ou bien un circuit peu étendu (capacité de fuite faible) et bien localisé (atelier, bloc opératoire…), ou alors un circuit bien défini (charges AC ou DC uniquement).

Réseau global : à l'inverse, un réseau global présente une variété de récepteurs et de redresseurs (présence de courants alternatifs et continus). Le réseau est souvent un réseau étendu (capacité de fuite élevée).

Défaut asymétrique (réseau DC) : il n'affecte qu'une polarité du réseau.

Défaut symétrique (réseau DC) : il affecte les deux polarités du réseau. Ce type de défaut se développe souvent dans un circuit où les longueurs respectives des conducteurs + et – sont comparables. Les normes CEI 61557-8 et EN 61557-8 imposent depuis fin 1997 que les circuits DC soient surveillés par des CPI capables de détecter des défauts symétriques.

Applications des CPI

Locaux à usages médicaux (HM 710) : les locaux à usages médicaux nécessitent des dispositions particulières liées à la continuité de service du réseau électrique et à la protection du malade comme de l'utilisateur des matériels médicaux.

Les dispositions générales relatives à l'appareillage électrique d'usage médical, émises par le comité 62A de la CEI, sont données au *tableau 6.3*.

Tableau 6.3 – Caractéristiques d'une installation à usage médical.

Courant maximal de mesure en recherche de défaut	1 mA
Tension maximale de mesure	25 V
Impédance du CPI	> 100 kΩ

Lors de la recherche de défaut, un générateur va délivrer un courant continu ou de fréquence 10,5 ou 2,5 Hz qui se superposera à celui de 50 Hz dans l'installation, et par une pince ampèremétrique on localise le défaut. Si le courant de sortie maximal dépasse le mA dans le récepteur en défaut en contact avec un chirurgien ou un malade, « l'opération n'a plus lieu d'être ».

Surveillance de l'isolement des moteurs hors tension : mesure préventive quand les besoins de sécurité et de disponibilité des matériels présentent un caractère obligatoire :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Équipements de sécurité :

– Moteur de pompe à incendie.
– Installation de désenfumage.
– Moteurs stratégiques ou gros moteurs.
– Cycles critiques dans les process industriels.

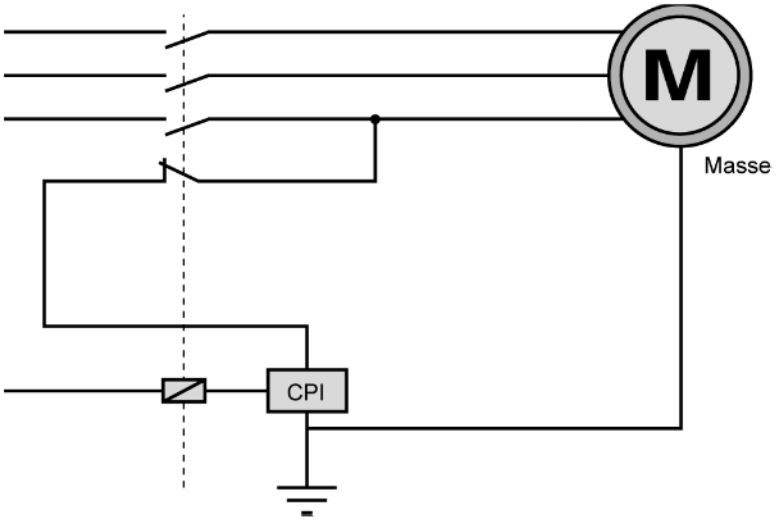


Figure 6.11 – Mesure de l'isolement sur un moteur asynchrone.

Surveillance des variateurs de vitesse : doit être pris en compte les basses fréquences générées par les variateurs de vitesse qui se confondraient avec les fréquences des courants de détection.
Il faut utiliser dans ce cas des CPI à signaux codés ou différents de ceux générés par les variateurs.
Groupes électrogènes mobiles : la protection des circuits alimentés par des groupes portatifs est difficile à mettre en place car la réalisation d'une prise de terre n'est pas toujours possible pour un matériel mobile soit parce que la prise de terre ne peut être validée par l'impossibilité de mesurer la résistance, soit qu'il y a une impossibilité physique de l'implanter. Ce sont souvent des DDR 30 mA qui protègent ce type d'installation, et qui ont l'inconvénient d'entraîner des déclenchements intempestifs préjudiciables en cas de continuité de service impérative. On utilise alors un CPI qui est connecté entre les masses des récepteurs interconnectées et une phase réseau.
Surveillance des départs avec fortes perturbations :

– Basses fréquences : la localisation des défauts dans ce type de circuits est maîtrisée par la synchronisation des injections de courant de recherche et des analyses par les localisateurs.
– Hautes fréquences : le localisateur central dispose d'une fonction de validation des mesures en renouvelant à la demande les cycles d'analyse.
– Forts courants homopolaires : les tores sont équipés de diodes d'écrêtement maîtrisant d'éventuelles surtensions secondaires.

Réseaux alimentés par des alimentations statiques sans interruption : elles comportent une partie alimentée en courant continu. Il est exigé de regrouper

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

l'installation alimentée en courant continu dans un même local de manière à assurer la protection par une équipotentialité des masses. Dans le cas où il n'est pas possible de respecter cette imposition, il est nécessaire de mettre un CPI qui surveille le bon isolement de l'installation alimentée en courant continu.

Autres critères :

Ne pas avoir en même temps, deux CPI qui surveillent des réseaux interconnectés galvaniquement.

Prévoir la mise en place de CPI adapté en fonction du réseau surveillé.

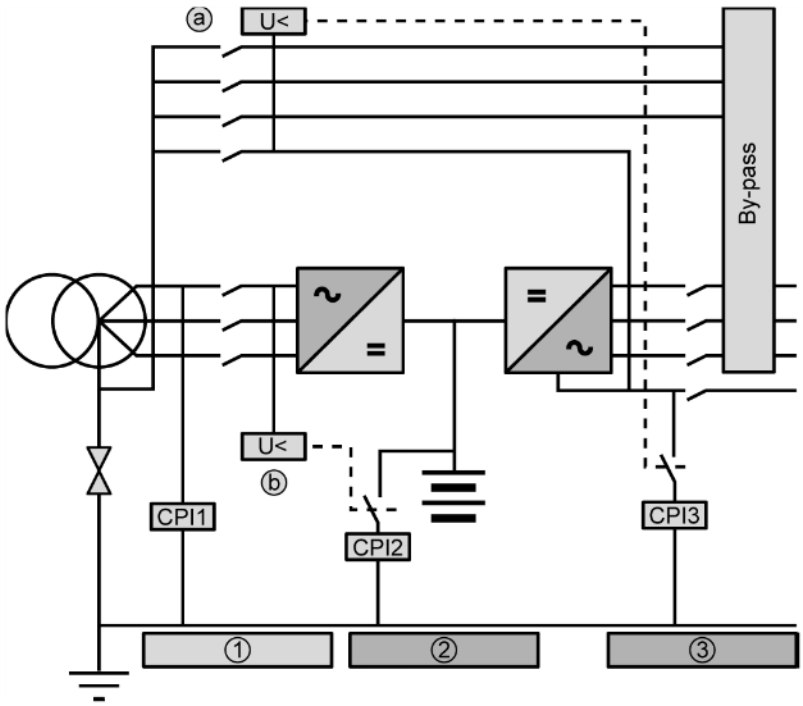


Figure 6.12 – Choix et placement des CPI suivant les types de réseaux.

CPI1 : peut surveiller des circuits avec des composantes continues et de fortes capacités de fuite. CPI2 : peut surveiller des circuits DC avec des défauts symétriques. CPI3 : peut surveiller des circuits AC (a) et (b), dispositif d'asservissement évitant la mise en parallèle de CPI sur des réseaux non isolés galvaniquement.

Surveillance des circuits de commande et de signalisation : alimentés le plus généralement par des transformateurs de séparation, ces circuits doivent assurer le non-enclenchement intempestif de circuits de puissance.

Une solution normalisée est de réaliser une distribution en schéma TN (voir « Mesure de résistance de terre » dans le chapitre 5). SLT TN = point commun bobine à la terre.

Une autre solution répond à ces impératifs en intégrant le non-raccordement à la terre du secondaire associé à la mise en place d'un CPI.

Cette solution prévient des risques de shuntage des organes de commande par un défaut d'isolement.

Ce défaut peut être à la fois suffisant pour commander les actionneurs et trop faible pour déclencher la protection contre les surintensités.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Ces risques sont plus importants sur les nouveaux équipements pour deux raisons :

– Les tensions d'utilisation sont faibles et ne favorisent pas l'affranchissement des défauts.
– Les seuils de fonctionnement des auxiliaires de commande évoluent vers quelques dizaines de milliampères (microrelais, automates, optocoupleurs…) comparée cette solution à une solution de mise à la terre, l'usage d'un réseau isolé associé à un CPI présente le double avantage de ne pas déclencher au premier défaut et d'assurer la surveillance préventive du vieillissement de l'ensemble.

Réglage du CPI :

$$Zm = \frac{U}{Ir}$$

U : tension d'alimentation maximale du circuit de commande.
Ir : courant de retombée du plus petit relais.
Zm : impédance de réglage du CPI.
Des systèmes de recherche de défaut fixe et portatif permettent d'effectuer la localisation préventive des défauts d'isolement, sans changer l'état des organes de commande ou de fonctionnement grâce à un courant de recherche limité à 1 mA.

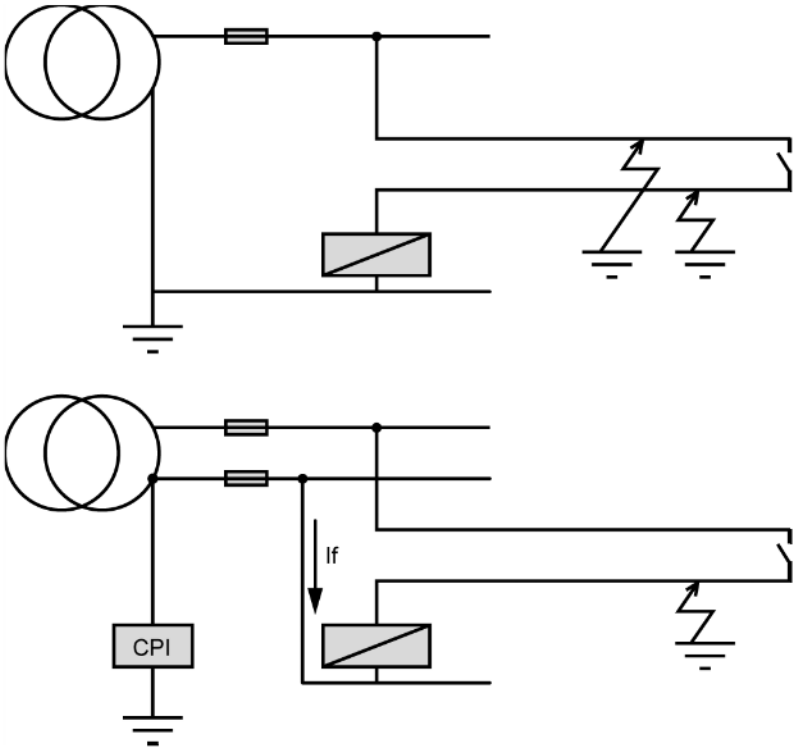


Figure 6.13 – Risques de shuntage des organes de commande par un défaut d'isolement.

Raccordement des CPI dans des cas bien particulier : généralement, il se fait entre le point neutre du transformateur situé à l'origine de l'installation IT et la terre. L'installation doit être complétée par un dispositif d'alarme et une protection contre les surtensions (si transformateur HT/BT).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Des CPI de bonne qualité ne nécessitent aucunement d'insérer une impédance de 1 kΩ en parallèle.
Annonçant au service électrique l'intervention sur un premier défaut d'isolement à opérer.
Cas n° 1 : accessibilité à la terre
Dans le cas où aucun point n'est relié à la terre, le CPI est inséré entre le point neutre du transformateur et la prise de terre des masses la plus proche ou à défaut, la prise de terre du neutre.
Cas n° 2 : alimentation par plusieurs transformateurs
Si les transformateurs sont toujours prévus pour débiter en parallèle, un seul CPI suffit.
Si les transformateurs peuvent débiter indépendamment l'un et l'autre. Il faut équiper chaque transformateur d'un CPI et prévoir un asservissement évitant de faire fonctionner deux CPI lorsque le réseau est coupé.

Réglage du CPI

Le seuil du CPI doit être réglé à 20 % en dessous de la résistance d'isolement du réseau ou du circuit à surveiller. Si la résistance d'isolement à surveiller est égale à 1,25 fois la limite supérieure du domaine de réglage du CPI alors celui-ci sera réglé à sa valeur limite. *Exemple* : résistance d'isolement à surveiller 500 kΩ, utilisation d'un CPI réglé à sa valeur maximale de 200 kΩ, car 1,25 × 200 = 250 kΩ < 500 kΩ.

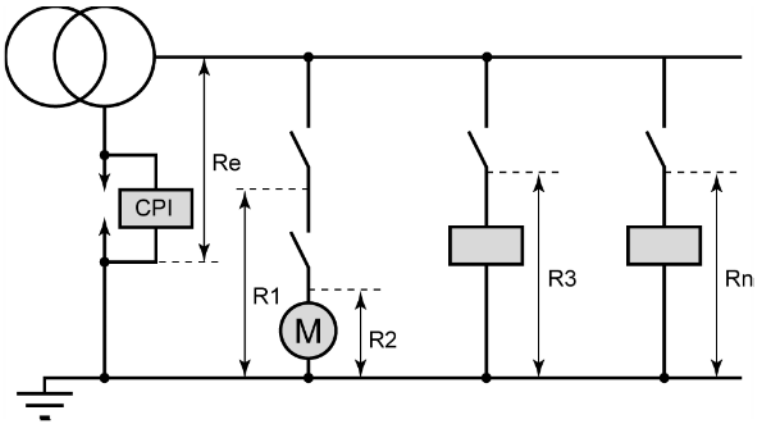


Figure 6.14 – Réglage du CPI.

$$\frac{1}{Re} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \ldots + \frac{1}{Rn} \text{ avec } R1,\ R2\ldots\ Rn \geq 0{,}5\ \text{M}\Omega$$

Lors de la mise en service d'un CPI, il faut prendre en compte que l'appareil va mesurer l'isolement global de l'installation, soit la somme des résistances de fuite individuelle de chaque départ.
Dans le cas de la mise en place de CPI dans une installation à fort process, un premier réglage à – 40 % est conseillé.
L'assainissement du réseau grâce à un CPI adapté, des campagnes de mesures et la mise en place d'un DLD (dispositif de localisation de défaut), permettent de remonter le réglage au-dessus des 20 % préconisés.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Certaines fois l'humidité après une mise hors tension prolongée peut occasionner une baisse de la résistance d'isolement sans qu'il y ait pour autant de défaut franc, la mise en tension pourra faire remonter le niveau d'isolement (NFC 15-100).

■ Raccordement et protection des circuits de mesure des CPI

La protection contre les courts-circuits n'est pas autorisée par le texte actuel de la NFC 15-100 pour éviter les risques de non mesure mais suppose une mise en œuvre appropriée pour éviter les risques de courts-circuits (pas de trajet de conducteur sur les arêtes vives de jeu de barres et conducteurs surisolés).

L'auto-surveillance du raccordement au réseau de la plupart des CPI rend la disposition caduque.

– Le branchement du CPI avant l'interrupteur de couplage du transfo évite des asservissements entre CPI en cas de couplage du réseau.
– Le branchement du CPI après l'interrupteur de couplage de transformateur permet la mesure préventive hors tension du réseau (signal de mesure présent sur les phases et ne nécessitant pas de rebouclage par les enroulements du transformateur, *figure 6.15*).

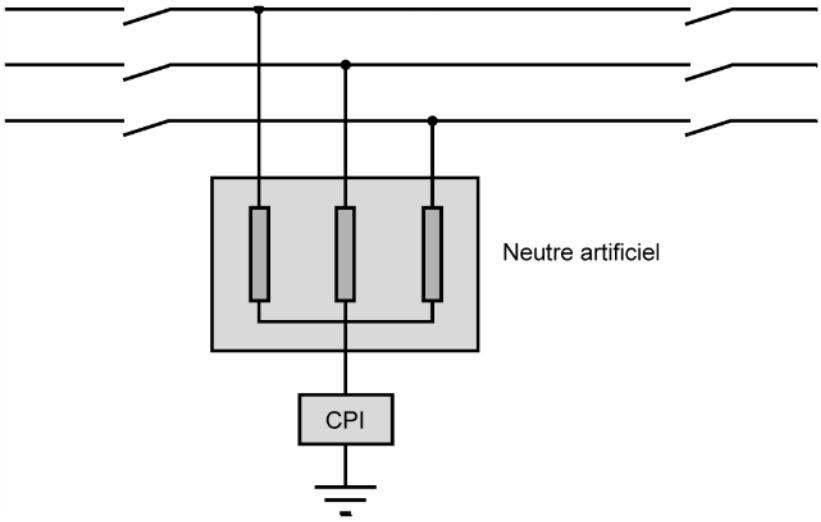


Figure 6.15 – Surveillance d'un réseau hors tension. Utilisation du neutre artificiel. L'entrée de l'alimentation auxiliaire doit être protégée.

■ Le limiteur de surtension électrodynamique (LSE)

Fonction : écoulement à la terre des surtensions et des courants de défauts (§ 4 et 5 de l'article 5 et 34 du décret du 14 novembre 1988).

□ Fonction parafoudre

Le LSE assure l'écoulement à la terre des surtensions arrivant par le réseau HT. Après amorçage du parafoudre, celui-ci reprend son état initial et ne nécessite aucune intervention quel que soit le nombre de surtensions écoulées.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Fonctions écoulement des surintensités

Les surintensités sont dues aux amorçages accidentels entre les circuits HT/BT. Elles risquent de porter le potentiel de l'installation BT à une valeur dangereuse par rapport à la terre. En cas de détection de ce type de défaut, le LSE court-circuite définitivement le neutre et la terre, permettant ainsi de protéger le réseau BT.
Après fonctionnement en limiteur de surintensité, il faut changer le LSE, notamment en schéma IT, pour permettre au contrôleur d'isolement de reprendre correctement la surveillance.

Figure 6.16 – Limiteur de surtension.

■ Installation du limiteur de surintensité (LSE)

Il est installé entre le neutre et la terre ou entre phase et la terre si le neutre est non accessible.
Une installation IT est protégée contre les surtensions si les conditions du *tableau 6.4* sont respectées.

Tableau 6.4 – Caractéristiques du limiteur suivant les niveaux de tensions et son mode de connexion.

	Limiteur de surtension connecté entre neutre et terre			Limiteur de surtension connecté entre phase et terre		
Tension nominale de l'installation (V)	Niveau d'isolement mini de l'installation (V)	Tension nominale du limiteur (V)	Niveau de protection effectif (V)	Niveau d'isolement mini de l'installation (V)	Tension nominale du limiteur (V)	Niveau de protection effectif (V)
127/220	1 100	250	900	1 200	250	1 000
230/400	1 200/1 650	250/440	1 000/ 1 350	1 800	440	1 500
400/690	1 800/2 400	440/660	1 500/ 2 000	2 800	660	2 300
580/1 000	2 700	660	2 240	–	–	–

Si plusieurs transformateurs sont en parallèle, il faut prévoir un LSE pour chaque transformateur. Pour les installations à neutre non accessible, veiller à raccorder l'ensemble des LSE sur la même phase.

■ Self de limitation

Le limiteur de surintensité, le LSE permet d'écouler un courant de 20 kA en 0,2 s. En fonction de la puissance du transformateur HT/BT, il est possible de dépasser

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

cette valeur limite. Il faut alors insérer, en série avec le LSE, une self de limitation de courant. Elle permet surtout en cas d'augmentation de la puissance générale installée de s'acquitter d'un éventuel redimensionnement des conducteurs de protection.

Tableau 6.5 – Valeur des selfs en fonction de la puissance du transformateur.

Puissance du transformateur	Tension BT	Self de limitation
P > 500 kA	172-230 V	16 µH
P > 850 kA	230-400 V	25 µH
P > 1 100 kA	500 V	33 µH
P > 1 300 kA	600-660 V	50 µH

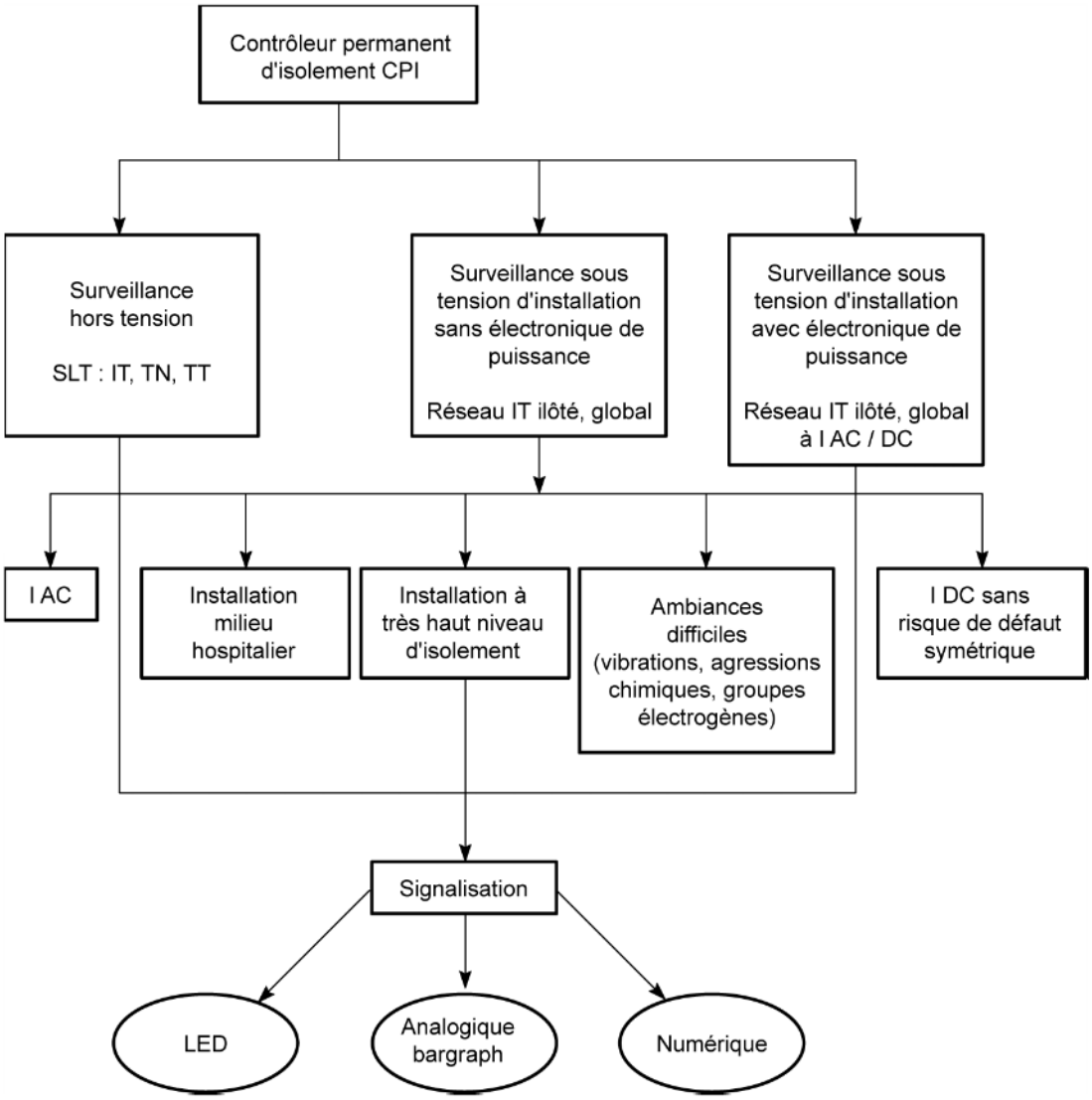


Figure 6.17 – Organigramme de choix d'un contrôleur d'isolement fixe (CPI).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Présentation d'un CPI de Socomec (AM 475, *figure 6.17 bis*) : surveillance du niveau d'isolement de réseaux globaux ou îloté ou circuits AC ou DC ou mixte non raccordés à la terre (SLT IT).

Figure 6.17bis – CPI AM 475 de Socomec.

1. Bouton poussoir TEST/RESET combiné : appui bref (< 1 s) = reset ; appui long (> 2 s) = test. **2.** Led de mise sous tension ON. **3.** Leds d'alarme allumées en mode : fixe : dépassement du seuil d'alarme ; clignotant : défaut de raccordement des bornes terre/KE ou L1/L2. **4.** Micro-interrupteurs de configuration. **5.** Potentiomètre de réglage du seuil d'alarme n° 1. **6.** Potentiomètre de réglage du seuil d'alarme n° 2. **7.** Vumètre à Leds (lecture directe en kΩ).

■ Normes

Tous les appareils de mesure de résistance d'isolement doivent répondre à la norme européenne CEI 314 équivalant en France à la NFC 15-100 pour des tensions inférieures ou égales à 500 V à l'exception des TBTS et TBTP.

Bien évidemment les appareils exportés en Allemagne seront conformes à la VDE 0413 partie 1 mesure d'isolement (courant de 1 mA) ainsi qu'à la BS 761 (713-04/713-06/713-08) pour la Grande-Bretagne.

Il est conseillé de faire des relevés tous les ans (NFC 15-100) mais il est préférable d'augmenter la périodicité afin de mieux suivre l'évolution du matériel.

Toute mesure doit être accompagnée d'un relevé hygrométrique et thermique afin de renouveler la mesure dans les mêmes conditions et de pouvoir les comparer.

6.3.2 Appareillage de localisation de défaut

■ Objectif

Ils assurent la localisation de défaut d'isolement par identification rapide du circuit en défaut dans les installations étendues en régime IT, TNS et TT et peuvent être fixes ou portatifs.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Fonctionnement (fixe ou portatif)

Le principe est d'injecter un courant de recherche (de valeur assez faible, voire très limitée lors d'une utilisation dans le milieu hospitalier ≈ 1 mA) et de recueillir celui-ci sur le départ subissant un défaut, grâce à des tores de détection (jusqu'à 12 départs).

Bien évidemment avec une liaison numérique par bus RS485 on peut gérer plusieurs couples : injecteur + localisateur par un localisateur central associé à une passerelle jbus/modbus pour un report sur un superviseur.

Le localisateur central permet la synchronisation et la surveillance de l'ensemble des produits, le démarrage du cycle via le clavier ou en face avant, la synchronisation du signal de localisation en coordination avec l'injecteur et scrutation simultanée de chaque localisateur déporté, affichage des départs et des valeurs de défauts, affichage des entrées-tores avec indications des défauts de liaisons ou de court-circuit, paramétrage des modes de mémorisation des défauts, fonction auto-test des entrées des tores et de l'ensemble des produits connectés, une fonction permet d'interroger individuellement chaque tore et de cibler rapidement un départ en défaut, extension de la durée de mesure sur des départs perturbés, il peut aussi alterner mesure du CPI avec mesure du localisateur de défaut…

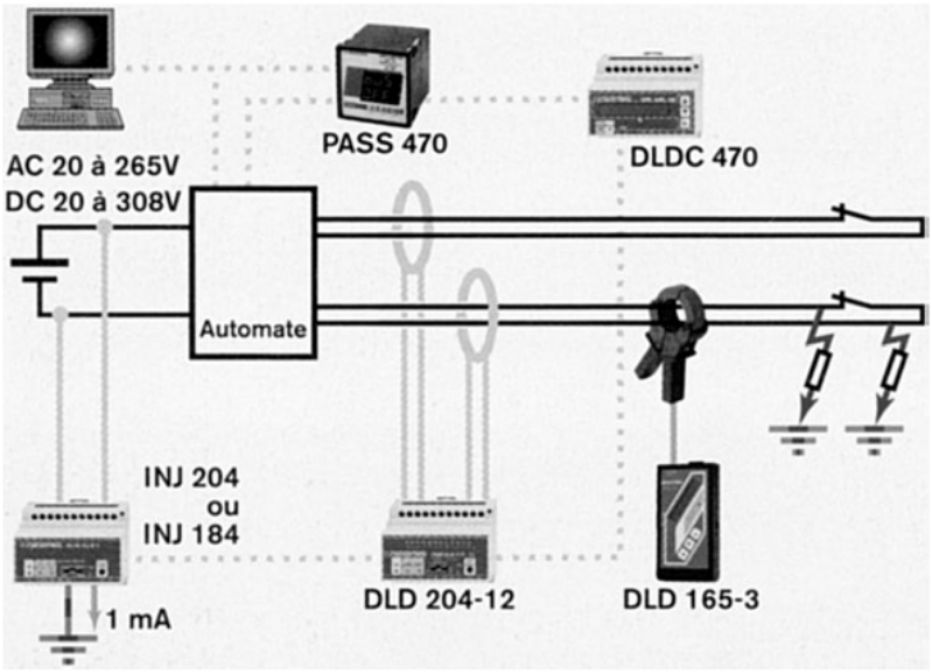


Figure 6.18 – Applications en fixe : salle d'opération schéma IT (NFC 15211), ou circuits de commande, de régulation, process en industrie pétrochimique… ou circuits de commande de machines en schéma IT selon la norme EN 60204.

Vous trouverez sur le site web de Socomec les documentations techniques des appareils dédiés à l'exploitation du SLT IT :

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Application :

– Mise en évidence de courant fugitif.
– Localisation de courants homopolaires.
– Prévention et diagnostic des déclenchements intempestifs des différentiels « effet sympathie », courants résultant des filtrages…

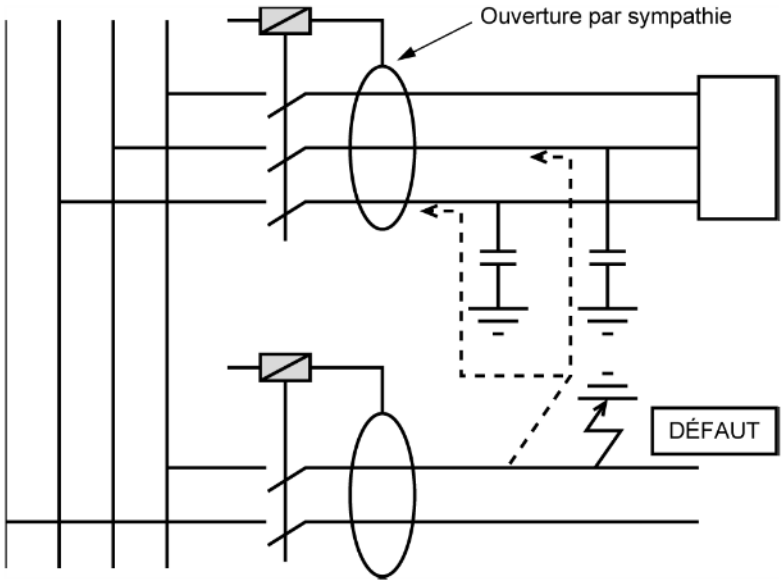


Figure 6.19 – Rappel sur l'effet « sympathie ».

Principe : injection d'un courant de recherche de 10 ou 25 mA de 24 à 500 VAC ou 24 à 360 VDC.

Fonctionne en mode dispositif de localisation de défaut (DLD) en schéma IT ou en mode différentiel en schéma TN ou TT mesure du courant de fuite.

Un défaut d'isolement important affectant un départ peut par rebouclage dans les capacités de fuite d'un autre départ, faire déclencher ce dernier sans qu'il n'y ait eu de dégradations de l'isolement du circuit considéré.

Ce phénomène est observé sur des départs longs et ou des départs ayant de très fortes capacités de fuite.

■ Choix d'un dispositif de localisation de défaut (DLD)

Voir l'organigramme de la *figure 6.20*.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

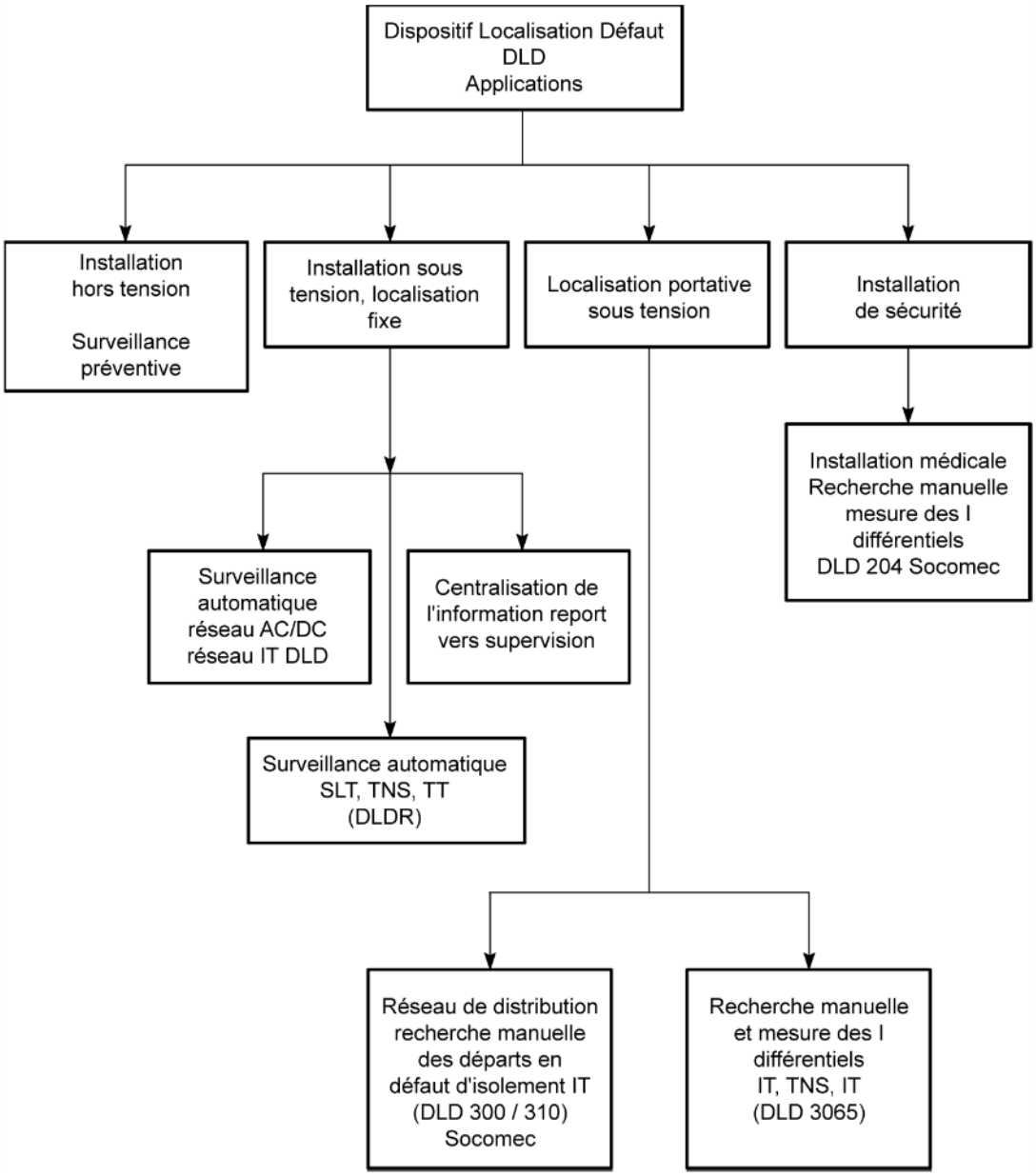


Figure 6.20 – Organigramme de choix d'un dispositif de localisation de défaut (DLD).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

7 • TEST DE DIFFÉRENTIEL ET MESURE DE COURANT DE COURT-CIRCUIT

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Objectif : mesurer les courants de court-circuit pour dimensionner les appareils de protection et contrôler la protection électrique d'une installation (test de différentiel) quel que soit son schéma de liaison à la terre (type TT, TN et IT) ou ses caractéristiques cas de départ long ou non, et ceci pour la plus petite valeur de ces courants.

7.1 Rappels théoriques

■ Principe de fonctionnement du dispositif différentiel à courant résiduel : DDR

(Neutre à la terre, voir les schémas de liaison à la terre au chapitre 5.)
En l'absence de défaut nous aurons :

$$I_1 = I_2$$

En présence d'un défaut d'isolement nous aurons :

$$I_1 > I_2 \text{ avec } I_1 - I_2 = I_f$$

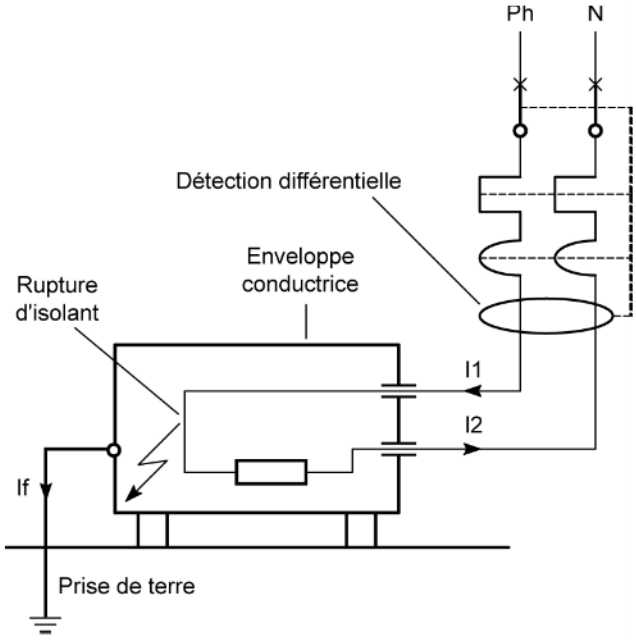


Figure 7.1 – Dispositif différentiel.

Le circuit de détection du différentiel va détecter cet écart entre le courant « sortant » produisant un flux « sortant » et le courant « rentrant » produisant un flux « rentrant » ouvrant ainsi les contacts.
L'équipement sera automatiquement mis hors tension.

7.2 Structure interne d'un disjoncteur différentiel monophasé

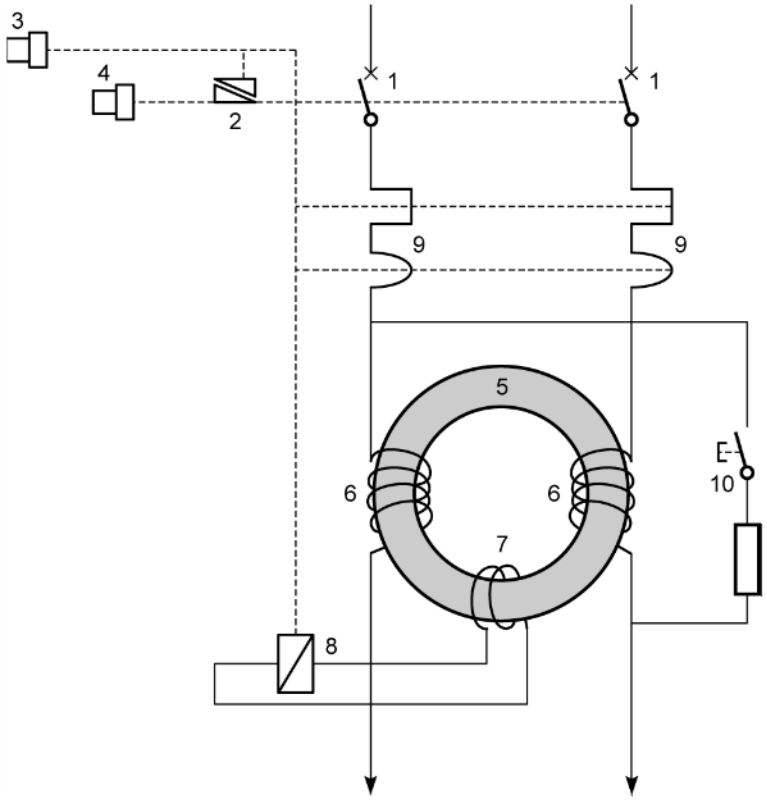


Figure 7.2 – Structure interne d'un disjoncteur différentiel monophasé.
1. Contact de puissance. **2.** Accrochage mécanique. **3.** Élément de déclenchement. **4.** Élément de réarmement. **5.** Tore magnétique. **6.** Bobinages principaux. **7.** Bobine de détection. **8.** Relais sensible de détection. **9.** Détection thermique et magnétique. **10.** Bouton test.

Fonctionnement plus détaillé :

En absence de défaut (*figure 7.3*) :

– $I_f = 0$
– $I_1 = I_2$
– $\Phi_1 = \Phi_2$
– $\Phi_R = \Phi_1 - \Phi_2 = 0$

Donc pas de flux résultant Φ_R induit dans la bobine K_1.
$\boldsymbol{e = -N.d\Phi/dt = 0}$, la bobine K_2 n'est pas excitée, les contacts restent enclenchés.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

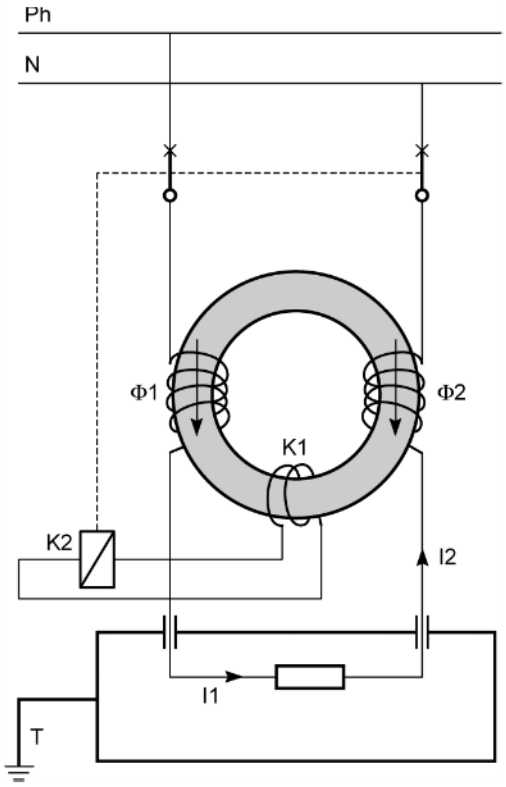


Figure 7.3 – DDR en absence de défaut.

En présence d'un défaut d'isolement (*figure 7.4*) :

- $I_f \neq 0$
- $I_1 > I_2$
- $\Phi_1 > \Phi_2$
- $\Phi_R = \Phi_1 - \Phi_2 \neq 0$

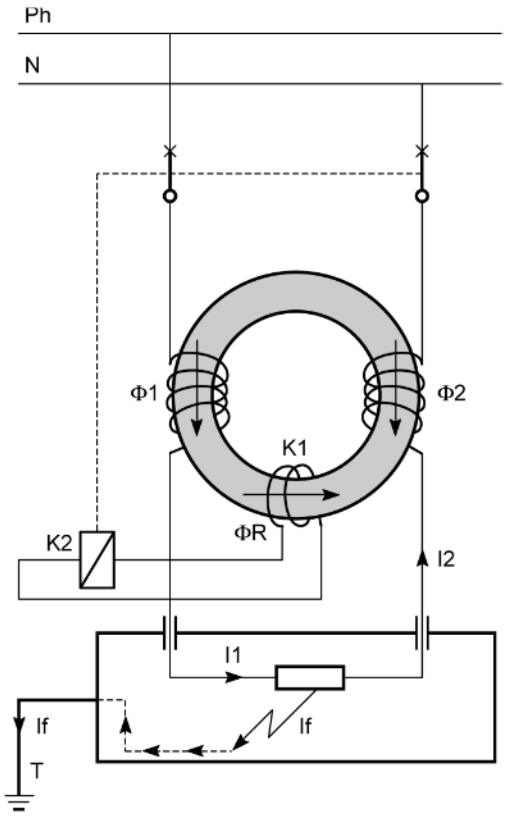


Figure 7.4 – DDR en présence de défaut.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Un courant et un flux résultant Φ_R est donc induit dans la bobine K_1…
$\boldsymbol{e = -N.d\Phi/dt \neq 0}$, un courant est induit dans la bobine K_2 qui est excitée, les contacts sont déclenchés.
L'équipement est mis hors tension.
Le disjoncteur tétrapolaire possède un fonctionnement similaire.
En présence d'un défaut, nous aurons :

$$\vec{I_1} + \vec{I_2} + \vec{I_3} \neq \vec{I_n}$$

Le flux dans le tore sera différent de zéro, une tension apparaîtra, un courant sera donc induit dans la bobine de détection et celle-ci provoquera le déclenchement du disjoncteur.

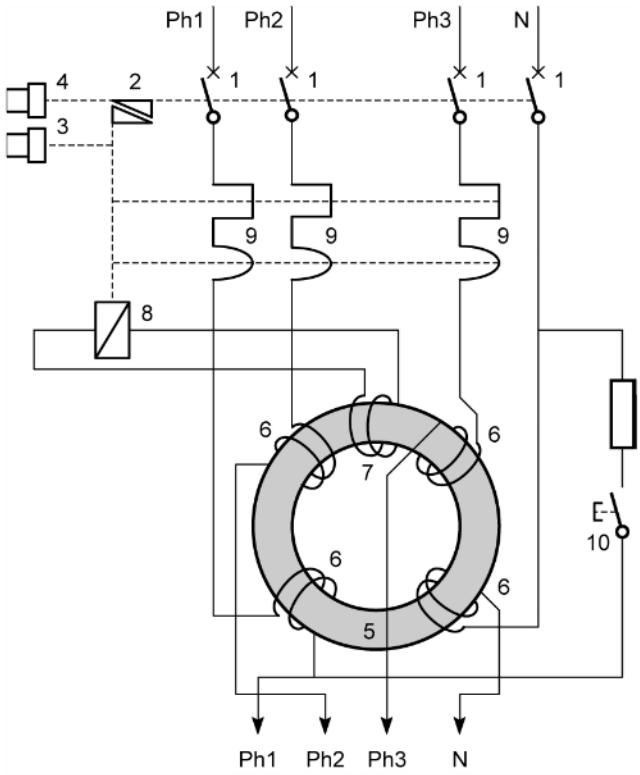


Figure 7.5 – Structure interne d'un DDR triphasé.

7.3 Présentation et choix des dispositifs différentiels à courant résiduel (DDR)

7.3.1 Présentation

On distingue les interrupteurs différentiels et les disjoncteurs différentiels. Ce sont tous deux, des appareils ayant deux fonctions indépendantes regroupées dans un même boîtier mais l'interrupteur n'a qu'une fonction interrupteur et différentielle alors que le disjoncteur a en plus, la fonction de protection contre les surcharges et les courts-circuits (magnéto-thermique).
On choisira l'interrupteur différentiel lorsqu'il n'y a pas besoin d'assurer la protection surcharge et court-circuit, ces protections étant assurées en amont par fusible et/ou disjoncteur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Lorsque ces protections ne sont pas assurées en amont, le disjoncteur différentiel s'impose.

7.3.2 Qu'est-ce que la sensibilité d'un dispositif différentiel ?

On appelle sensibilité d'un dispositif différentiel, notation $I\Delta n$, la valeur dite de « courant résiduel » de défaut pour lequel le dispositif s'ouvrira obligatoirement.
En général, chaque disjoncteur différentiel est prévu pour déclencher entre $I\Delta n/2$ et $I\Delta n$ (*tableau 7.1*).
En outre, les disjoncteurs et interrupteurs différentiels disposent d'un bouton de test à manœuvrer périodiquement (tous les mois) pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil.
Ce circuit met le dispositif en déséquilibre et simule ainsi un déclenchement différentiel.

Tableau 7.1 – Plage de déclenchement d'un différentiel en fonction de son seuil de sensibilité.

Plage de déclenchement	Sensibilité $I\Delta n$
Entre 5 et 10 mA	10 mA
Entre 15 et 30 mA	30 mA
Entre 150 et 300 mA	300 mA

Lorsqu'il détecte un défaut, un différentiel ouvre le circuit dans un temps compris entre 20 et 30 ms. Ce temps est indépendant de la sensibilité de l'appareil et de la valeur du courant de défaut. Il est réglable pour certains blocs différentiels adaptables et permet d'instaurer une sélectivité de type chronométrique (voir ci-dessous) ; on parle de différentiel retardé utilisable uniquement en tête d'installation si tous les départs divisionnaires sont protégés par des différentiels instantanés. En aucun cas ce type de protection ne devra être employé seul (NFC 15-100).

7.3.3 Comment choisir la sensibilité de son disjoncteur différentiel de tête ?

Elle doit respecter la condition suivante :

$$I\Delta N \leq \frac{UL}{RU}$$

avec *UL* tension limite de sécurité (50 V en local sec, 25 V en local humide), *RU* résistances d'utilisation des masses métalliques. *Uc* la tension de contact doit toujours rester inférieure à *UL*.
Mais la norme NFC 15-100 impose ou recommande l'emploi d'une protection différentielle de sensibilité inférieure ou égale à 30 mA dans des cas tels que : prise de terre de valeur trop élevée (sol sablonneux ou granitique), exploitations agricoles, magasins de jouets animés, appareils utilisés sur la voie publique, laboratoires et

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 7.2 – Choix de la sensibilité d'un DDR en fonction de *RU* et du type de local.

Calibre maximum du DDR	Résistance maximale des masses *RU* (en Ω)	
	UL = 50 V local sec	*UL* = 25 V local humide
3 A	16	8
1 A	50	25
500 mA	100	50
300 mA	166	83
30 mA	1 666	833

salles techniques des établissements scolaires, chantiers, stands forains, terrains de camping et de caravaning, quais des ports de plaisance, salles d'eau, éclairage extérieur (jardins), prises de courant pour petit appareillage, électroportatif d'extérieur (tondeuse, taille-haie…), piscines, bassins et fontaines, sanitaire des immeubles collectifs, cabines téléphoniques et abris bus, câbles chauffants sans armature métallique et noyés dans le sol, locaux à risque d'explosion, groupes électrogènes.

Dans le cas des locaux comportant un risque d'incendie la protection sera assurée par un dispositif différentiel de sensibilité **300 mA** (*station service, stockage de produits inflammables*).

Dans le cas général les locaux d'habitation seront équipés en tête de distribution d'un différentiel de sensibilité **500 mA**.

7.3.4 Existe-t-il une réglementation particulière dans les locaux d'habitation ?

Dans les locaux d'habitation, le risque d'électrocution est dû à la présence d'eau dans certaines pièces et à la nature plus ou moins conductrice du sol.

Cuisine : eau + sol conducteur (carrelage), **buanderie** : eau + sol conducteur (carrelage ou ciment).

Sous-sol : eau + sol conducteur (ciment), **salle d'eau** : eau + sol conducteur (carrelage).

Pour les trois premiers types de pièces, les prises de courant doivent être équipées de fiches de terre (2P+T). Ces prises seront installées à plus de 25 cm du sol si celui-ci est conducteur.

Les masses métalliques des appareils doivent être raccordées à la terre. Certains appareils ne comportant pas de prise de terre pourront cependant être utilisés dans ces locaux s'ils sont de **classe II double isolation**.

À l'extérieur, les circuits d'éclairage devront être raccordés à la terre s'ils sont de **classe I** (lanternes métalliques, etc.) ou de **classe II** (double isolation et ne disposant donc pas par définition de borne de terre).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

7.3.5 Qu'appelle-t-on sélectivité entre deux disjoncteurs (différentiels ou non) ?

Définition : pour des installations où la continuité de service est impérative, un défaut d'isolement sur une partie de l'installation ne doit pas avoir d'incidence sur l'ensemble d'où la nécessité de prévoir une sélectivité des systèmes de protection. Le dispositif de protection juste en amont du défaut devra être déclenché, et lui seul.

Il existe deux types de sélectivité :

– partielle : Q1 va déclencher un peu après Q2, à partir d'une valeur du courant de court-circuit ;
– totale : seul le dispositif de protection le plus près du défaut Q2 va déclencher.

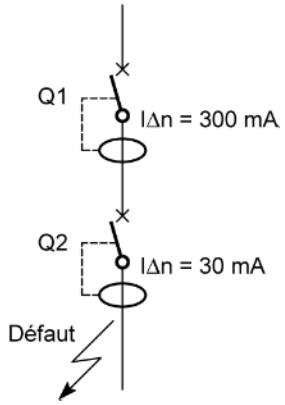


Figure 7.6 – Schéma unifilaire d'une installation afin d'étudier la sélectivité ampèremétrique.

Pour avoir une sélectivité totale, il faudra respecter :

– la sélectivité ampèremétrique : est basée sur l'écart entre les valeurs des calibres en courant des deux disjoncteurs ;
– la sélectivité chronométrique : est basée sur l'écart entre les temps de déclenchements ou temps de fusion des fusibles.

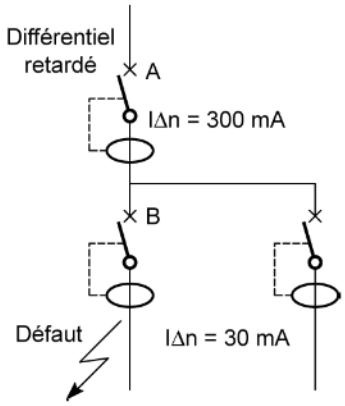


Figure 7.7 – Schéma unifilaire d'une installation afin d'étudier la sélectivité ampèremétrique associée à la sélectivité chronométrique pour obtenir une sélectivité totale.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

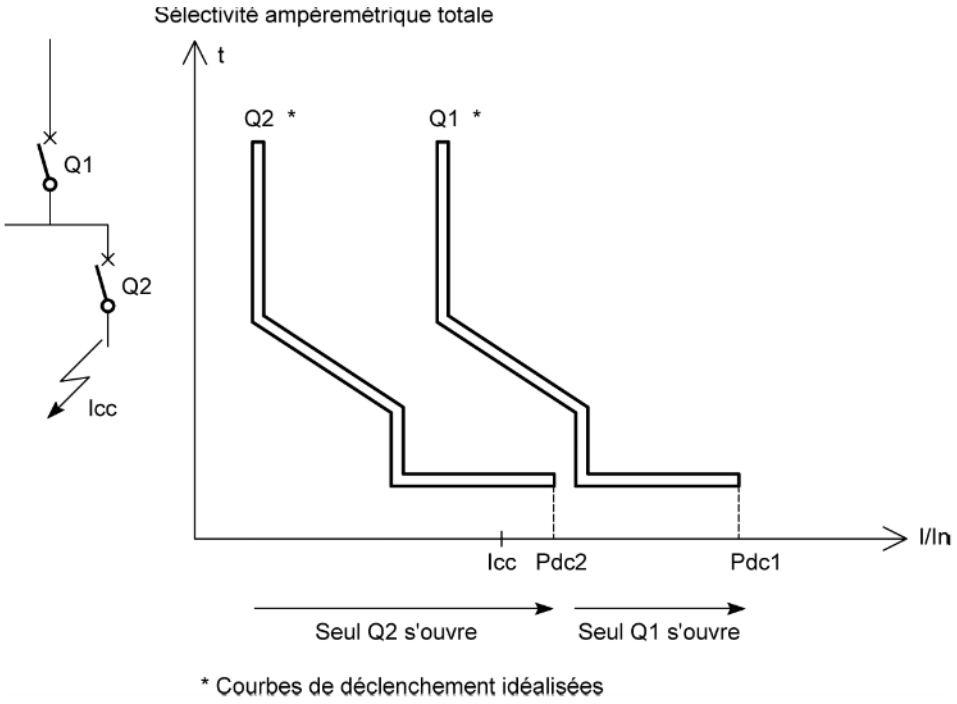


Figure 7.8 – Sélectivité ampèremétrique totale entre Q2 et Q1.

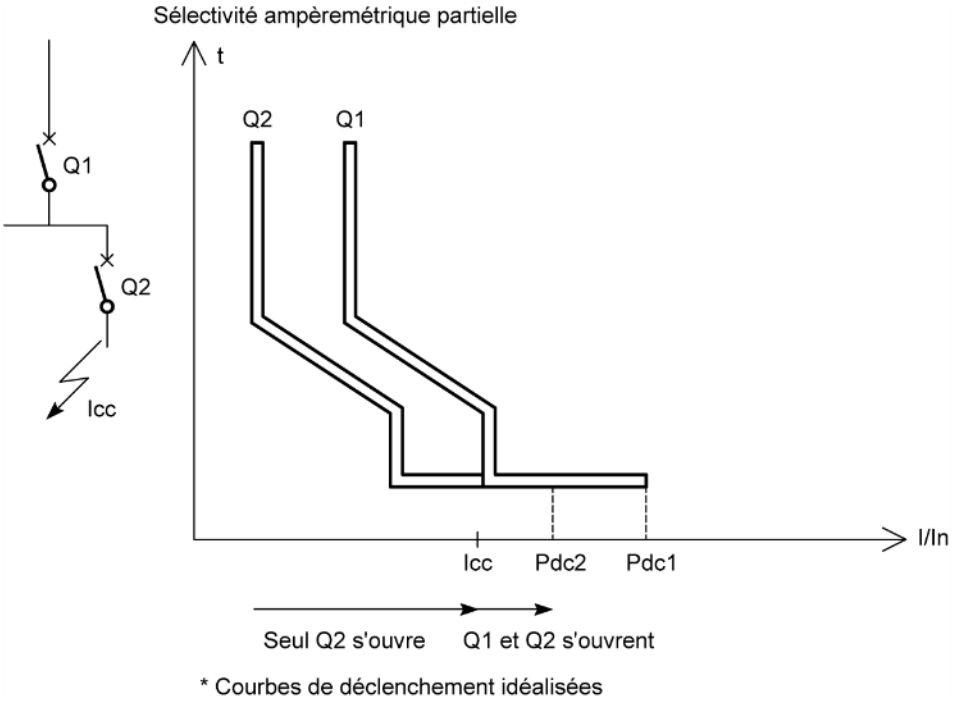


Figure 7.9 – Sélectivité ampèremétrique partielle entre Q2 et Q1.

On peut améliorer la sélectivité en utilisant le pouvoir de limitation du disjoncteur Q1, pour obtenir une sélectivité totale (filiation). Cela permet de réduire le coût du disjoncteur Q2 qui peut être choisi avec un pouvoir de coupure (*Pdc*) inférieur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

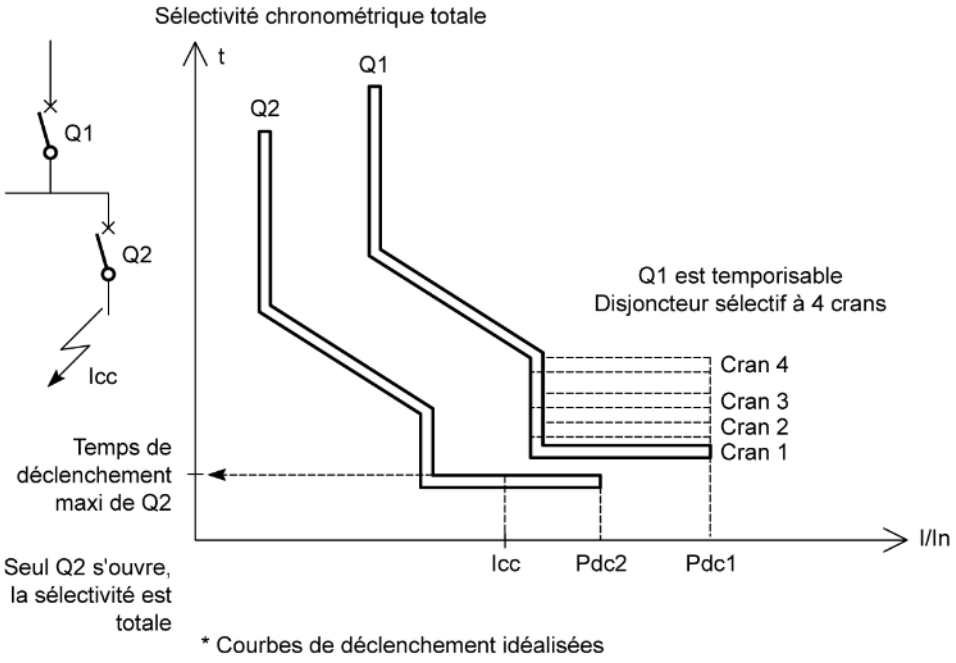


Figure 7.10 – Sélectivité chronométrique totale entre Q2 et Q1.

Un retardateur mécanique ou statique (logique) améliore le niveau de sélectivité.

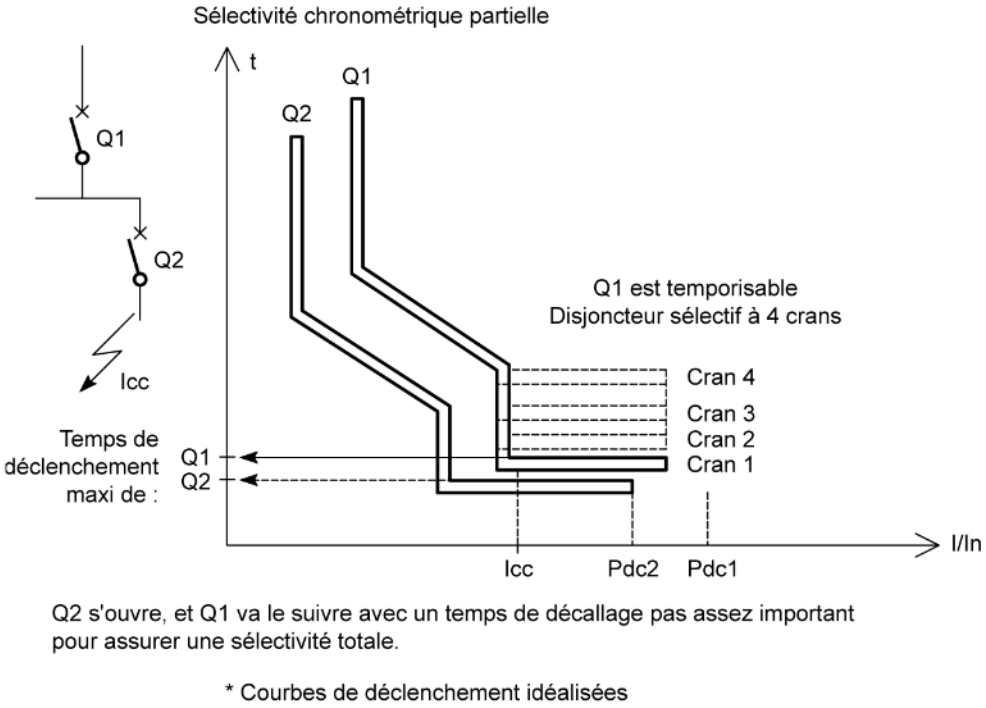


Figure 7.11 – Sélectivité chronométrique partielle entre Q2 et Q1.

Conclusion : pour assurer une sélectivité totale, on respecte en pratique, la sélectivité ampèremétrique en vérifiant que $I\Delta N$ amont (Q1) est supérieur à 2 $I\Delta N$ aval (Q2) et la sélectivité chronométrique en instaurant un cran d'écart entre l'amont et l'aval (Q2 étant un disjoncteur aval donc à déclenchement instantané).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

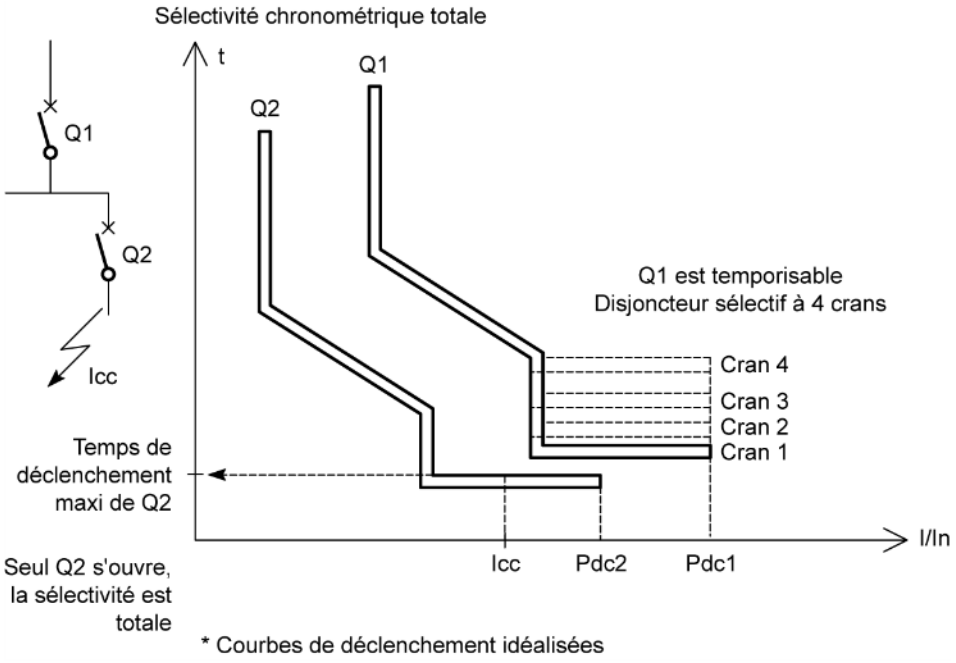


Figure 7.10 – Sélectivité chronométrique totale entre Q2 et Q1.

Un retardateur mécanique ou statique (logique) améliore le niveau de sélectivité.

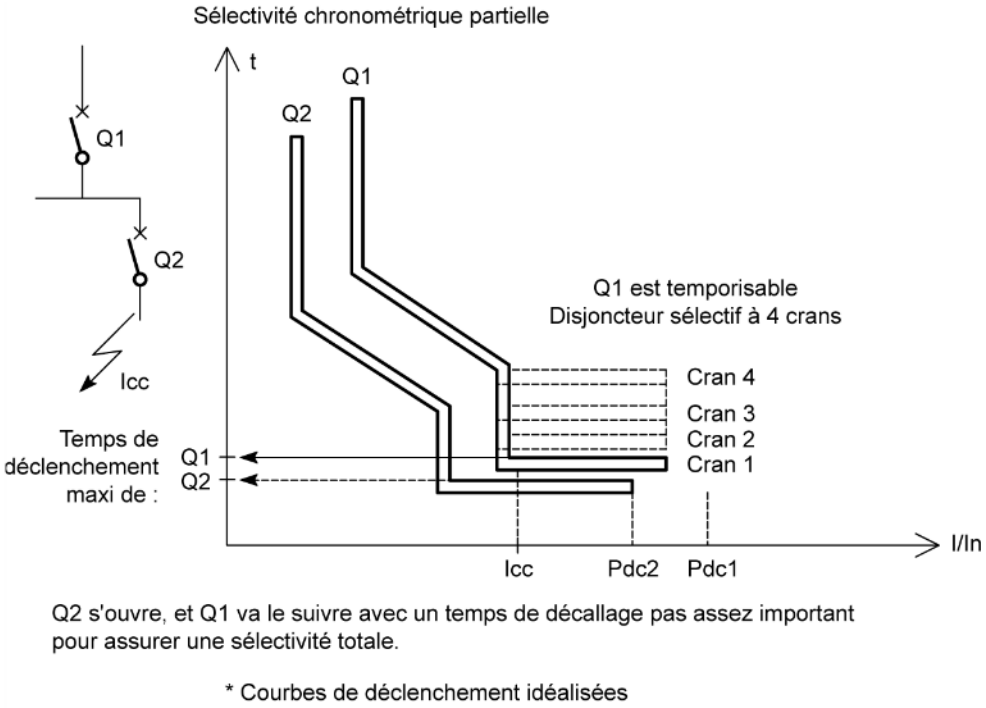


Figure 7.11 – Sélectivité chronométrique partielle entre Q2 et Q1.

Conclusion : pour assurer une sélectivité totale, on respecte en pratique, la sélectivité ampèremétrique en vérifiant que $I\Delta N$ amont (Q1) est supérieur à 2 $I\Delta N$ aval (Q2) et la sélectivité chronométrique en instaurant un cran d'écart entre l'amont et l'aval (Q2 étant un disjoncteur aval donc à déclenchement instantané).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

7.3.6 Synthèse

Le différentiel fonctionnera à deux conditions :

– **Si le choix de sa sensibilité est correct (bonne connaissance de la valeur de la résistance *Ru* de la prise de terre des masses métalliques)**, en effet si la résistance de terre devient trop élevée par vitrification du sol ou autre, le courant de fuite sera inférieur au courant de déclenchement du différentiel. Le différentiel ne déclenche pas et ne sert donc à rien.
– **Si la terre est parfaitement connectée sans terre, le différentiel ne voit plus la différence entre le courant entrant et sortant, il est hors d'usage. Dans ce cas, prévoir un 30 mA**.

Conseil : si vous constatez qu'une protection différentielle a déclenché, il ne faut surtout pas remettre l'équipement sous tension. Il faudra détecter et éliminer le défaut en premier lieu.

7.4 Rappels sur les différents schémas de liaison à la terre : SLT ou régime de neutre

Un réseau de distribution est caractérisé par :

– la nature du courant ;
– le nombre de conducteurs actifs ;
– le régime de neutre (ou schéma de liaison à la terre, SLT).

La sécurité des personnes et du matériel est fonction du régime de neutre choisi dans l'installation.

7.4.1 Rappel de quelques définitions

Conducteur actif : c'est l'ensemble des conducteurs affectés à la transmission de l'énergie électrique y compris le neutre.
Masse : partie conductrice susceptible d'être touchée et normalement isolée des parties actives mais pouvant être portée accidentellement à une tension dangereuse.
Contact direct : contact des personnes avec les parties actives des matériels électriques (conducteurs normalement sous tension).
Protection contre les contacts directs (décret du 14 novembre 1988) :

– Mise hors de portée des conducteurs actifs au moyen d'obstacles ou par éloignement.
– Isolation des conducteurs actifs.
– Barrière ou enveloppe : IP2X ou xxB pour les parties actives.
– L'ouverture de l'enveloppe ne doit être possible que dans les cas suivants :
  • avec l'aide d'un outil ou d'une clé ;
  • après mises hors tension des parties actives ;
  • si une deuxième barrière IP2X ou xxB se retrouve à l'intérieur de l'enveloppe.
– Emploi de dispositif à courant résiduel de 30 mA. Ceci est reconnu comme mesure de protection complémentaire en cas de défaillance d'autres mesures de protection contre les contacts directs. Disposition obligatoire pour des prises de courant < 32 A.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Utilisation de la TBT (très basse tension de sécurité).

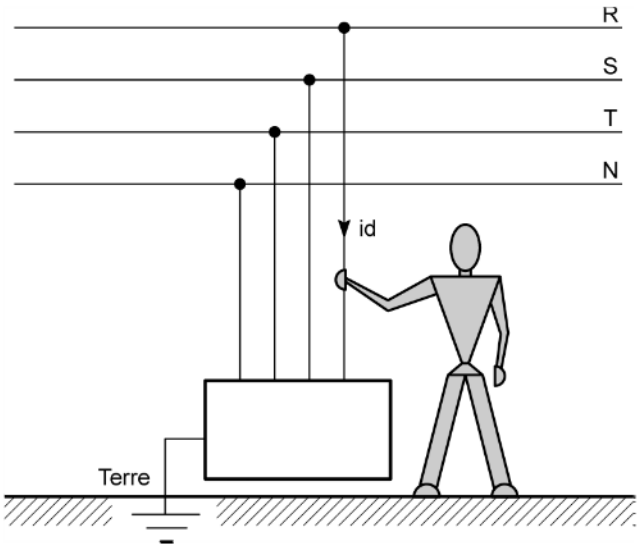


Figure 7.12 – Contacts directs.

Contact indirect : contact des personnes avec des masses mises accidentellement sous tension (généralement suite à un défaut d'isolement).
Cette protection peut se faire de deux manières :

– avec coupure automatique de l'alimentation ;
– sans coupure automatique de l'alimentation.

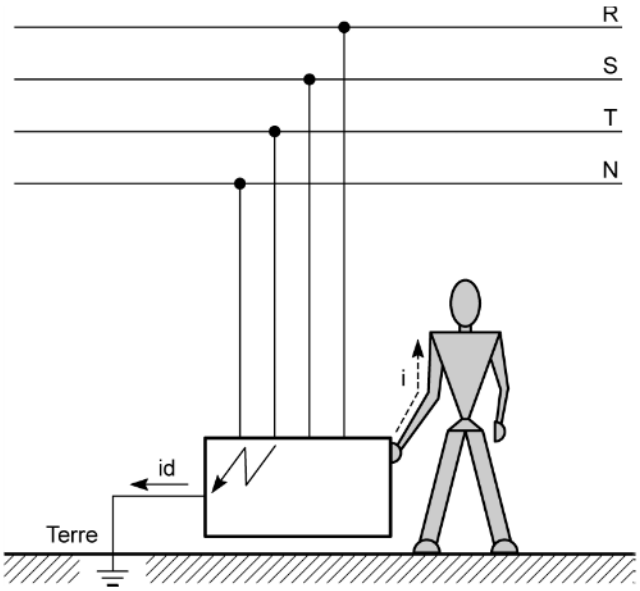


Figure 7.13 – Contacts indirects.

Protection sans coupure automatique de l'alimentation : elle est assurée par :

– l'utilisation de la TBT (TBTS ou TBTP ou TBTF) ;
– la séparation des masses métalliques de telle manière qu'une personne ne puisse être en contact simultanément avec deux masses ;
– la double isolation du matériel classe II ;
– la liaison équipotentielle non reliée à la terre de toutes les masses simultanément accessibles ;
– la séparation électrique par transformateur pour des circuits < 500 V.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Protection avec coupure automatique de l'alimentation : elle vise à séparer l'alimentation, le circuit ou le matériel, présentant un défaut d'isolement entre une partie active et la masse.

Pour éviter des effets physiologiques dangereux pour une personne qui viendrait en contact avec une partie en défaut, on limite la tension de contact *Uc*, à une valeur limite *UL* dépendante :

– du courant I_L admissible par le corps humain ;
– du temps de passage du courant ;
– du schéma de liaison à la terre ;
– des conditions d'installation.

Les normes NFC 15-100 et CEI 364 définissent le temps de coupure maximal du dispositif de protection dans les conditions normales (*UL* = 50 V local sec ou 25 V local humide).

UL est la tension la plus élevée qui peut être maintenue indéfiniment sans danger pour les personnes (*tableau 7.3*).

Tableau 7.3 – Temps de coupure maximal des disjoncteurs en fonction du type de local et de la valeur de la tension de contact présumée au point.

Tension de contact présumée	Temps de coupure maximal du dispositif de protection (en s)	
	UL = 50 V	*UL* = 25 V
25	5	5
5	5	0,48
75	0,60	0,30
90	0,45	0,25
110	–	0,18
120	0,34	–
150	0,27	0,12
220	0,17	–
230	–	0,05
280	0,12	0,02
350	0,08	–
500	0,04	–

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

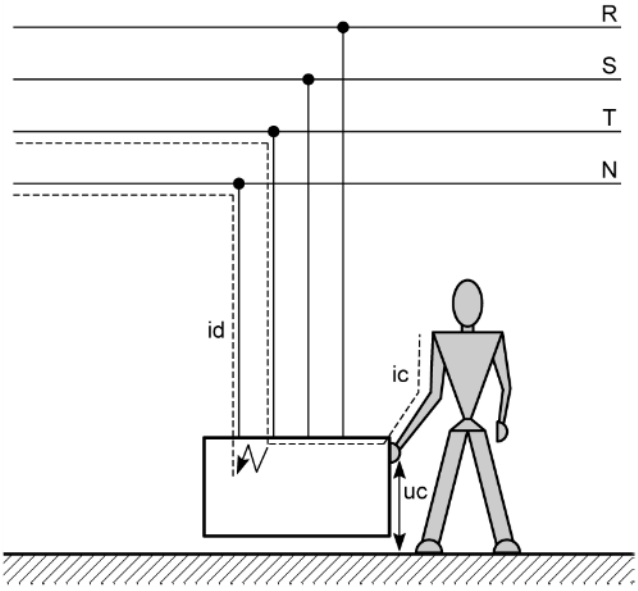


Figure 7.14 – Localisation des grandeurs *Id* et *Uc*.

Cette mise hors tension se fera différemment selon le schéma de liaison à la terre choisi : ils consistent à définir les principes de distribution assurant la protection contre les contacts indirects par une coupure automatique de l'alimentation.

7.4.2 Définition des différents schémas de liaison à la terre (SLT)

Trois régimes de neutre sont officialisés par la CEI et utilisés suivant les installations électriques. Ils sont caractérisés par 2 lettres (ou 3 pour le régime TN).

1re lettre : situation du neutre par rapport à la terre :

– T : liaison directe du neutre à la terre.
– I : absence de liaison du neutre à la terre : I = isolé ou liaison par l'intermédiaire d'une impédance : I = impédant.

2e lettre : situation des masses de l'installation :

– T : liaison des masses à une prise de terre distincte.
– N : liaison des masses au neutre.

Tableau 7.4 – Détails des caractéristiques des différents SLT.

Régime TT	Régime TN	Régime IT
Installations alimentées directement par un réseau de distribution publique BT dont le neutre est à la terre. Les masses métalliques sont reliées entre elles et à la terre.	TN-C : conducteur neutre et conducteur de protection confondus (PEN) : 4 fils. TN-S : conducteur neutre (N) et conducteur de protection (PE) séparés : 5 fils.	Le point neutre n'est pas mis à la terre ou l'est volontairement par l'intermédiaire d'une impédance élevée (1 000 Ω à 2 000 Ω). Les masses métalliques sont reliées entre elles et à la terre.

■ Étude du schéma de liaison à la terre TT

T : neutre d'alimentation à la terre.
T : masses des installations à la terre.
Voir *figure 5.3 et figure 7.15*.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

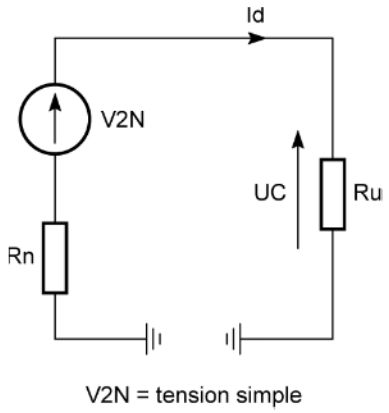


Figure 7.15 – Schéma équivalent.

Calcul du courant de défaut :

$$Id = \frac{V}{Ru + Rn} \qquad \text{si } Rd \text{ alors } Rd << Ru \text{ et } Rn$$

Calcul de la tension de contact :

$$Uc = Ru.Id$$

On note que dans un régime TT, il y a une élévation dangereuse du potentiel des masses métalliques lorsqu'il y a un défaut d'isolement.

Ainsi, il est nécessaire de couper au premier défaut.

Le courant *Id* va créer une surcharge qui sera vue par l'appareil de protection (fusible ou disjoncteur). C'est le thermique qui agira, mais le temps de déclenchement sera beaucoup trop long par rapport à celui donné par la courbe de sécurité.

Exemple : $Uc = 150$ V → temps maxi = 100 ms

Il faut donc un appareil autre que le bilame pour détecter ces courants de défaut et réagir très rapidement d'où l'utilisation d'un **dispositif à courant différentiel résiduel** (DDR).

□ Disjoncteur à courant différentiel résiduel (DDR)

Principe : voir § 7.1.

Seuil de sensibilité des différentiels :

- En cas de défaut : $Uc = Ru.Id$.
- Dès que $Uc = UL$ → coupure → $Id = UL/Ru$.
- Seuil à régler : $I\Delta N < UL/Ru$.
- Lors de la conception d'une installation, la valeur de *Ru* n'est pas connue. De plus, suivant l'état du sol, *Ru* peut varier. Ainsi, la relation précédente nous donne la valeur maximale de *Ru* qu'il faut essayer de respecter en fonction du différentiel.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 7.5 – Sensibilité du DDR en fonction de *Ru* et du type de local.

Calibre du DDR	Résistance maximale de *Ru*	
	UL = 50 V	*UL* = 25 V
3 A	16 Ω	8 Ω
1 A	50 Ω	25 Ω
500 mA	100 Ω	50 Ω
300 mA	166 Ω	83 Ω
30 mA	1 660 Ω	833 Ω

□ Conclusion sur le schéma de liaison à la terre TT

Trois conditions à respecter :

1re règle – Toutes les masses des matériels protégées par un même dispositif de protection doivent être interconnectées et reliées par un conducteur de protection (PE) à une même prise de terre.

2e règle – La condition de protection doit satisfaire à la relation suivante :

$$Ru . I\Delta n < UL$$

$I\Delta n$: courant de fonctionnement du dispositif de protection (A).

Ru : résistance de la prise de terre des masses.

U : tension de contact, elle est égale à UL.

Tension limite UL = 50, 25 V en fonction des locaux.

3e règle – Dans les schémas TT, on assurera la protection par un dispositif à courant différentiel résiduel.

Dans ce cas le courant Ia est égal au courant différentiel résiduel du disjoncteur.

La sensibilité d'un disjoncteur différentiel est indiquée par le symbole $I\Delta n$, qui indique le système de protection qui peut être un interrupteur ou un disjoncteur.

Le temps de déclenchement doit être inférieur à celui donné par les courbes de sécurité.

■ Étude du schéma de liaison à la terre TN

T : neutre d'alimentation à la terre.

N : masses des installations au neutre.

Principe : tout défaut d'isolement (phase-masse) est transformé en **un court-circuit entre phase et neutre**. On a donc $Id = Icc$.

Le conducteur PE ou PEN doit être de section suffisante.

Deux possibilités :

– **TN-C** : neutre et conducteur de protection confondus en un seul conducteur (PEN) (schéma dit à 4 fils). **Problème du TNC** : si un conducteur PEN est coupé,

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

toutes les masses correspondantes à ce PEN se trouvent portées à la tension simple dès qu'un récepteur monophasé est branché au réseau.

– **TN-S** : neutre et conducteur de protection séparés (schéma à 5 fils).

Conclusion :

– Utilisation du schéma TNC pour des conducteurs de $S > 10$ mm^2 Cu ou 16 mm^2 Alu.
– Pour des sections inférieures (conducteurs trop fragiles), schéma TNS obligatoire.
– Dans un schéma TNC/S, on ne doit jamais utiliser un schéma TNC en aval d'un schéma TNS, l'inverse est possible.

Schéma d'une installation à SLT TNC et TNS : voir *figure 5.4*.

☐ Étude d'un défaut d'isolement

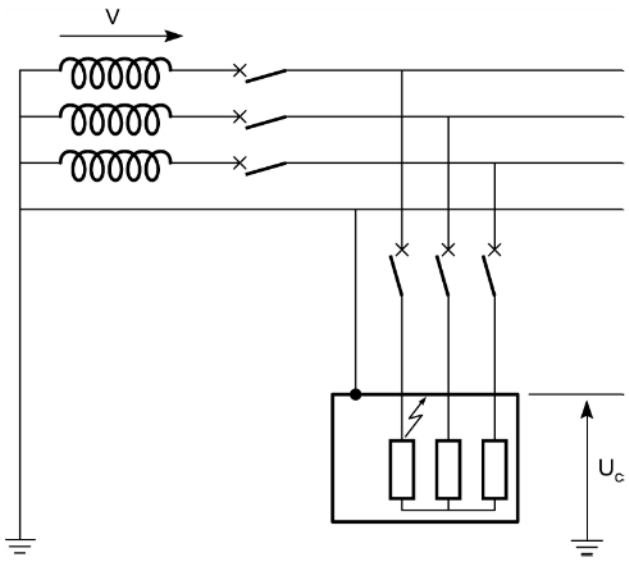


Figure 7.16 – Schéma d'une installation à SLT TNC en présence d'un défaut d'isolement.

Si un défaut phase masse apparaît, celui-ci est équivalent à un défaut phase-neutre : *Id* et *Uc* seront très élevées.

Le courant de défaut *Id* sera très grand puisqu'il n'est limité que par l'impédance des câbles.

Pour les différents calculs, la norme NFC 15-100 prend l'hypothèse que, lors de l'apparition d'un défaut franc, la tension a chuté de 20 % au point où est installé le dispositif de protection.

Calcul de *Id* et *Uc* :

$$Id = \frac{0{,}8\,\mathrm{V}}{Zph + Zpe}$$

$$Uc = Zpe.Id$$

$$Rph = Rpe = \rho L/S \text{ en m}\Omega$$

donc *Id* sera très important.

$$Uc = 0{,}8\ \mathrm{V}/2 \text{ si } Zph = Zpe$$

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

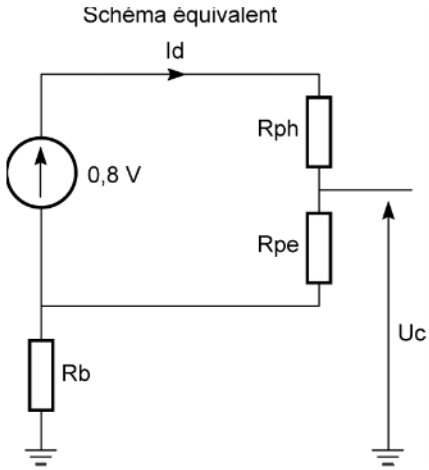


Figure 7.17 – Schéma équivalent de cette installation.

Conclusion :
Tension de contact *Uc* dangereuse > 50 V en local sec.
Id est important, prévoir un dispositif de protection contre les surintensités (disjoncteur ou fusibles).
Problème : vérifier si temps de coupure < temps maximal donné par les courbes de sécurité.
Si la section du conducteur actif est plus petite que la section d'un conducteur de phase, on obtient :

$$R_{\text{total}} = Rph + Rpe = \rho\frac{L}{Sph} + \rho\frac{L}{Spe}$$

On néglige les réactances des câbles.
On pose :

$$m = \frac{Sph}{Spe} \Rightarrow Uc = \frac{0{,}8\,.\,V\,.\,m}{1+m} \quad \text{et} \quad Id = \frac{0{,}8\,.\,V\,.\,Sph}{\rho\,.\,L\,.\,(1+m)}$$

☐ Conditions de protection

Protection par disjoncteur

Deux caractéristiques à vérifier : sur le courant et le temps de coupure.
Condition sur le courant :

$$Id > I_{\text{mag}}$$

Id courant de défaut.
I_{mag} courant de réglage du déclencheur magnétique.
Condition sur le temps :

$$t_{\text{décl}} < t_{\max}$$

avec $t_{\text{décl}}$ le temps de déclenchement du disjoncteur et $t_{\max}$ le temps de coupure maximal donné par la courbe de sécurité ou un tableau de valeurs.

Protection par fusibles

Condition sur le courant :

$$Id > I_{\text{fus}}$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Id courant de défaut.
I_{fus} courant assurant la fusion du fusible.

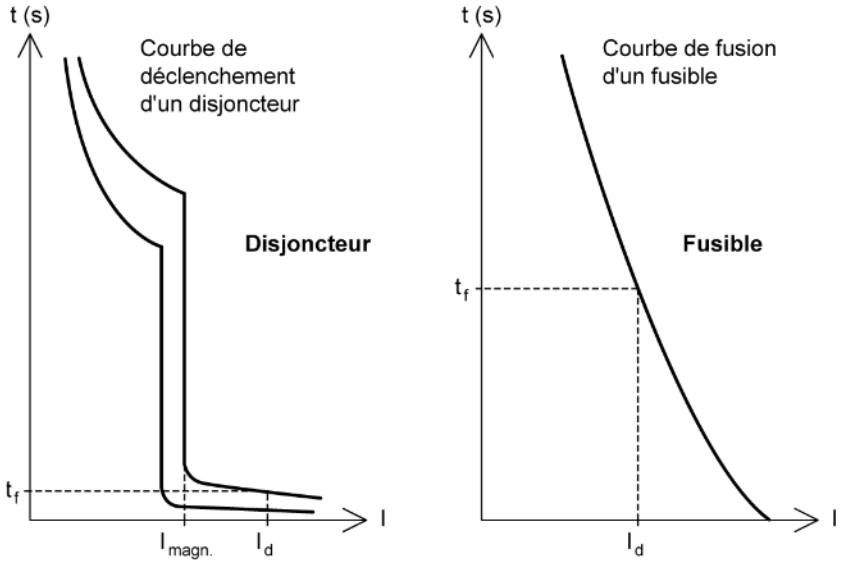


Figure 7.18 – Courbes de déclenchement d'un disjoncteur et de fusion d'un fusible.

Le point (t_{max}, *Id*) doit se situer au-dessus de la courbe de fusion.
Conclusion :
Si ces conditions ne sont pas respectées, il faut :
– limiter la longueur de câble (peu pratique) ;
– augmenter la section (peu économique) ;
– prendre un déclencheur adapté aux grandes longueurs : type B ;
– utiliser un dispositif à courant différentiel.

□ Synthèse sur le SLT TN

Principe de distribution adapté aux installations admettant une coupure au premier défaut (le défaut est équivalent à un court-circuit phase-neutre car seule l'impédance des conducteurs va limiter le courant de défaut).
La mise en œuvre et l'exploitation de ce type de réseau sont économiques mais nécessitent une installation rigoureuse du circuit général de protection.
Les conducteurs du neutre et de protection peuvent être séparés ou communs, tout dépend de la section utilisée.
Pour les installations rénovées ou avec extension, il est conseillé d'adjoindre des dispositifs différentiels à courant résiduel (DDR) aux disjoncteurs dans la boucle surtout quand l'impédance est mal maîtrisée surtout en distribution terminale.

■ Étude du schéma de liaison à la terre IT

I : neutre d'alimentation isolé de la terre ou relié par une impédance élevée.
T : masses des installations à la terre.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

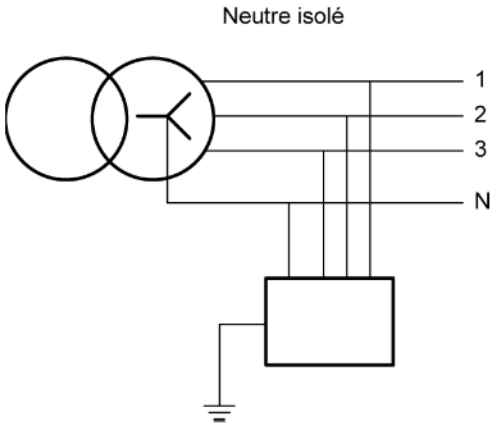


Figure 7.19 – Schéma d'une installation en SLT IT isolé.

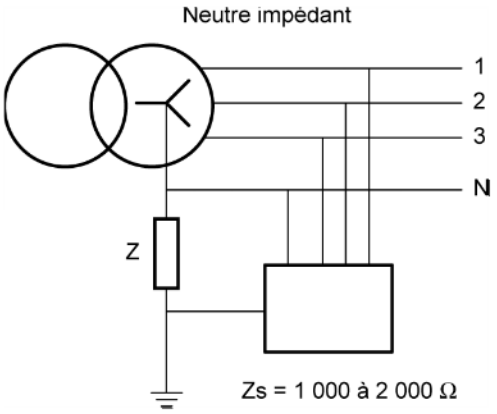


Figure 7.20 – Schéma d'une installation en SLT IT impédant.

Ces deux régimes sont semblables du point de vue du fonctionnement.

En fait, une installation possède entre phase et terre une impédance dite de fuite due :

– à une résistance d'isolement qui varie en fonction des isolants, des récepteurs… (= 10 MΩ/km) ;

– à une capacité parasite engendrée par les câbles (c = 0,3 µF/km).

On peut ainsi établir les schémas équivalents des *figures 7.21a et b*.

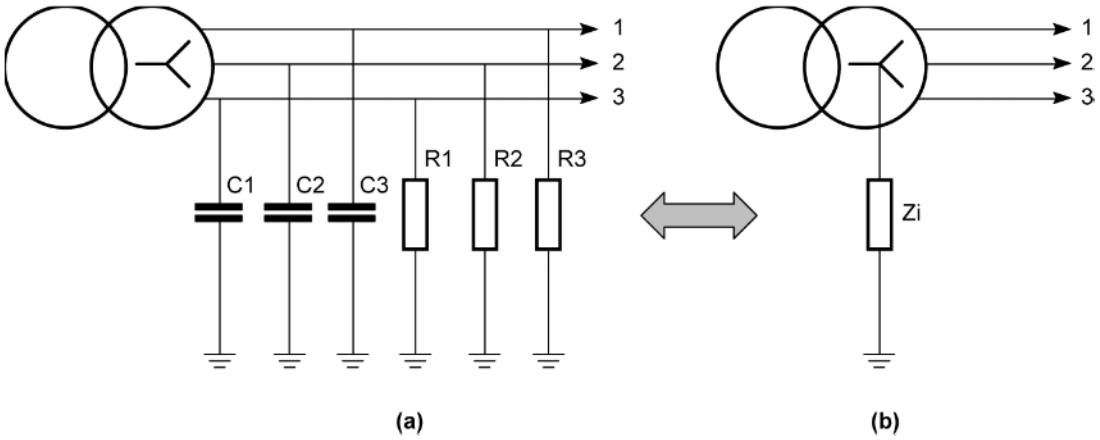


Figure 7.21 – (a) Capacités et résistances équivalentes et (b) impédance équivalente.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Cas d'un premier défaut d'isolement

Calcul de Zt

On considère une longueur de câbles de 1 km.
$Ct = 3C = 0{,}9\ \mu F \Rightarrow ZCt = 1/(Ct\,\omega) = 3\,540\ \Omega$
$Rt = R/3 = 3{,}33\ M\Omega$
***Zi* = 3 536 Ω** (on note que *Rt* a une influence négligeable devant *ZCt*)
Soit un défaut entre phase 1 et la masse dans l'installation présentée en *figure 7.22*.

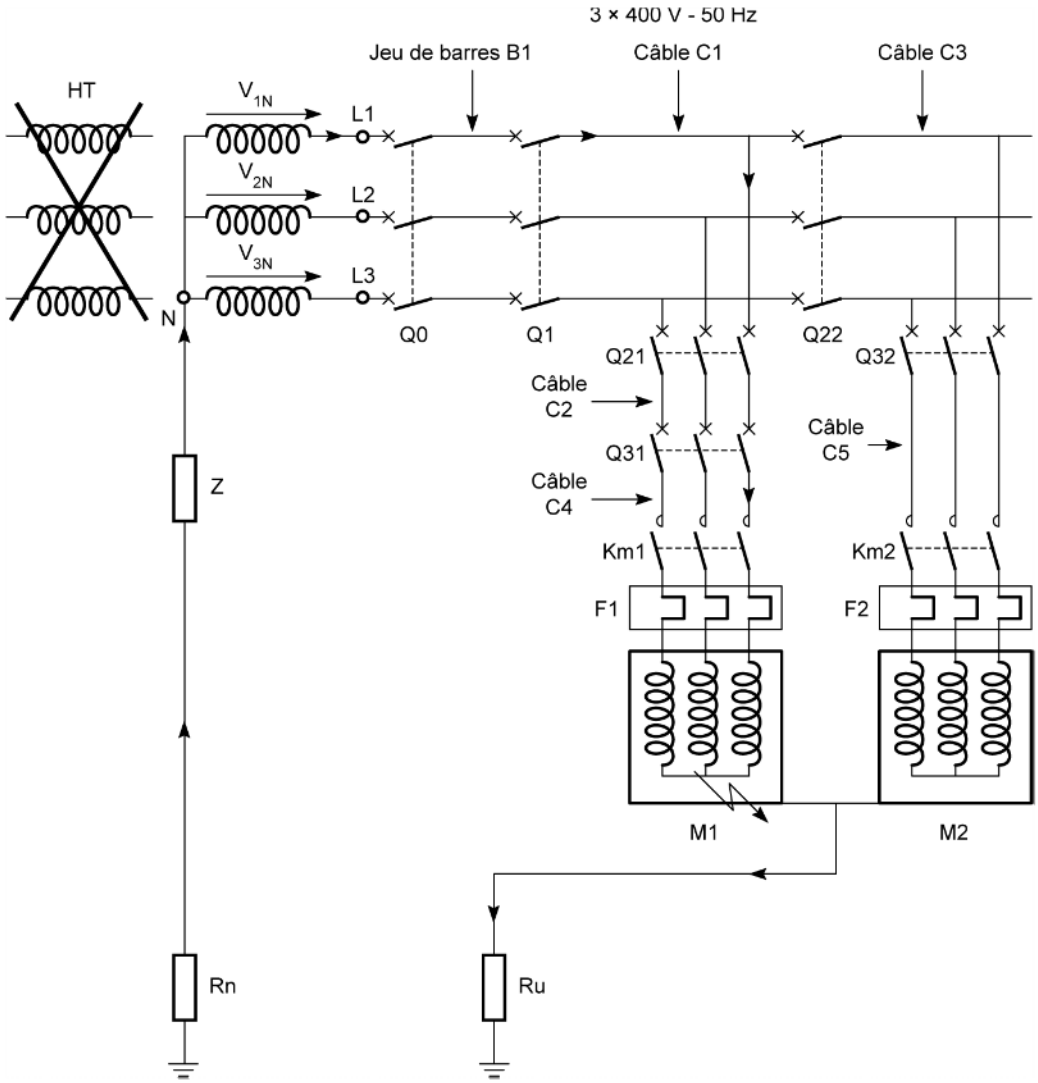


Figure 7.22 – Schéma de l'installation en SLT IT en présence d'un premier défaut d'isolement.

Calcul de Id et Uc (on prendra Zs = 2 000 Ω)

$Id = \dfrac{V}{Zs + RU + RN + \Sigma Z\text{câbles}} = \dfrac{V}{Zs}$ valeur faible de l'ordre de la dizaine de milliampères,
avec $\Sigma Z_{\text{câbles}} + RN + RU << Zi$,
$Uc = RU.Id$ de l'ordre de 5 V.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Conclusion

La tension *Uc* ne présente aucun danger pour les personnes, la présence de l'impédance garantie bien la continuité de service tout en protégeant les utilisateurs.
Le courant *Id* est trop faible pour faire déclencher un dispositif de protection, donc l'installation n'est pas perturbée, mais la résistance d'isolement ayant diminué en présence du défaut, le contrôleur permanent d'isolement CPI a enclenché le fonctionnement des alarmes sonore et visuelle.
Le fonctionnement d'un contrôleur permanent d'isolement CPI est semblable à un pont de Wheastone.
Un potentiomètre règle le seuil de basculement, l'autre bras englobe la résistance d'isolement du réseau de distribution (se reporter au chapitre 6).
Quand un défaut survient, il y a déséquilibre entre les deux bras du pont, une tension apparaît pour alimenter les alarmes via un relais.

☐ Cas d'un deuxième défaut d'isolement alors que le premier n'a pas disparu

L'un sur la phase 1 du récepteur n° 1, l'autre sur la phase 3 du récepteur n° 2 : *figure 7.23*.

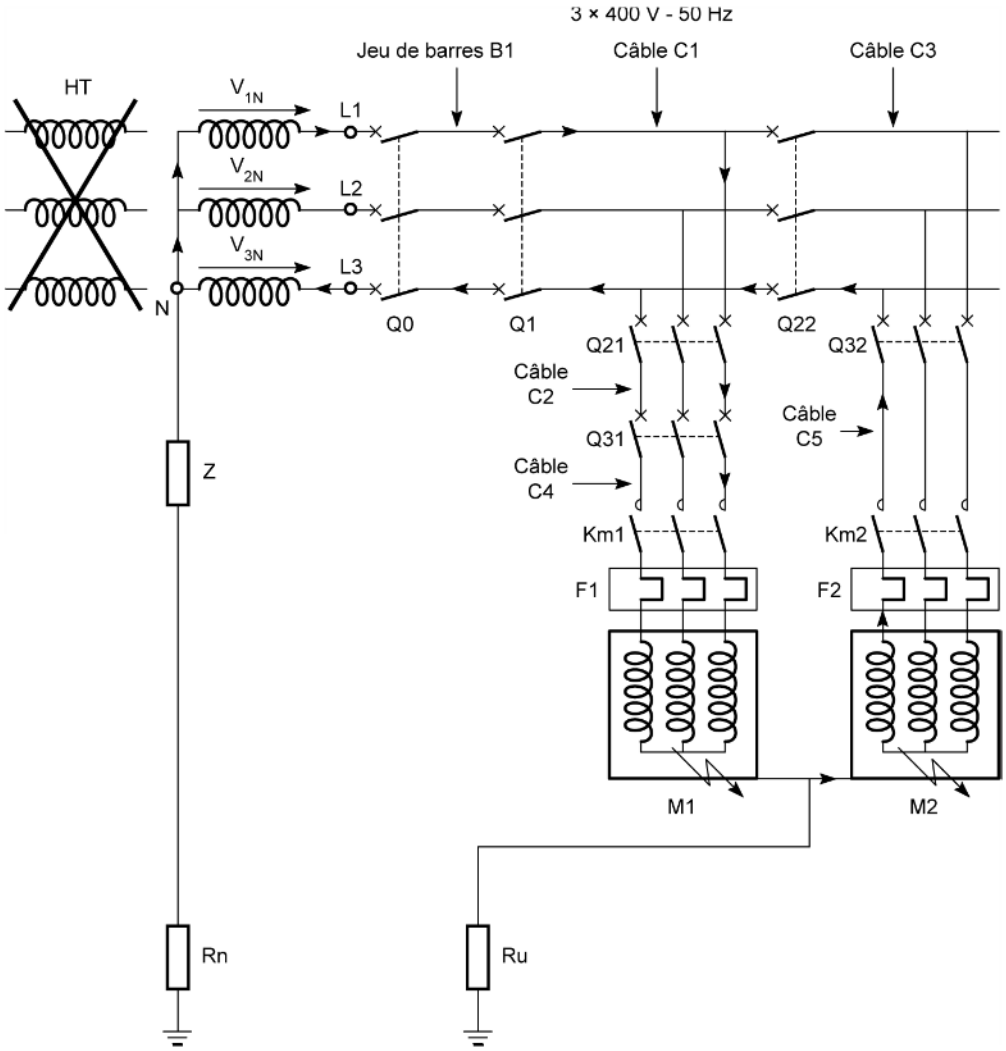


Figure 7.23 – Schéma de l'installation en SLT IT en présence du premier et d'un second défaut d'isolement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Calcul de Id et Uc

La tension U_{31} sera prise égale à 80 % de la tension nominale entre phases pour compenser les différentes pertes dans le transformateur lors d'un court-circuit.
Seule la somme des impédances des câbles C1, C2, C3, C4, C5, du transformateur et du jeu de barres va limiter la valeur du courant de court-circuit phase-phase.

$Id = \dfrac{0{,}8\,U}{\Sigma(Z\text{câbles} + Z\text{transfo} + Zjdb)} = \dfrac{V}{Zs} \rightarrow Id$ va tendre vers une valeur importante en kA.

$Uc = Uc1 = Uc2$ = tension dangereuse > 50 V

Conclusion

Le deuxième défaut est équivalent à un court-circuit entre phases.
Tension de contact dangereuse, d'où obligation de couper l'installation par dispositifs de protection contre les courts-circuits (disjoncteurs, fusibles).

☐ Protection en cas de double défaut

Deux conditions à vérifier :

– temps ;
– courant.

La protection des personnes sera assurée si lors d'un double défaut, l'un des deux systèmes de protection ouvre le circuit en un temps limité (voir norme).

Conditions sur le courant	Conditions sur le temp
$Id > I_{mag1}$ ou $Id > I_{mag2}$	temps décl. < temps max sécurité
$Id > I_{fus1}$ $Id > I_{fus2}$	

Vérification de la longueur des câbles

On a vu qu'il faut que $Id > I_{mag}$ pour assurer la sécurité des personnes. Le courant de défaut Id diminue lorsque la longueur des câbles augmente.
La condition $Id > I_{mag}$ se traduit donc par une condition sur la longueur L_{max} des câbles.
Le neutre n'est pas distribué :

$$m = Sph/Spe$$

$$Uc = \frac{0{,}8\,.\,U\,.\,m}{1 + m}$$

Le neutre est distribué :

$$m = Sph/Spe$$

$$Uc = \frac{0{,}8\,.\,V\,.\,m}{1 + m}$$

$$L_{max} = \frac{0{,}8\,.\,U\,.\,Sph}{2\rho(1 + m)\,.\,I_{mag}}$$

$$L_{max} = \frac{0{,}8\,.\,V\,.\,Sph}{2\rho(1 + m)\,.\,I_{mag}}$$

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

□ Conclusion sur le SLT en IT

Objectif : assurer la continuité de service de l'installation en même temps que la sécurité des personnes et des biens.

Pour assurer la continuité de service (et éviter les doubles défauts), il faut qu'un service compétent élimine le 1er défaut avant l'apparition d'un deuxième.

1er défaut : Id *et* Uc *très faibles*

Pas de risques pour les personnes.

Intervention d'un service d'entretien pour éliminer le défaut.

– L'installation continue à fonctionner.

2e défaut : équivalent à un court-circuit phase-phase, coupure de l'installation pour revenir à un défaut simple

– La norme impose la détection et la signalisation sonore et lumineuse au premier défaut par un contrôleur permanent d'isolement (CPI) installé entre neutre et terre.
– Elle impose aussi un limiteur de surtension branché au secondaire d'un transformateur BTB/BTA chargé d'écouler les surtensions à la terre.
– Si une extension est à effectuer (grande longueur de câble) ou si la prise de terre des masses métalliques est séparée de celle du neutre ou si il y a plusieurs prises de terre des masses métalliques, prévoir l'ajout d'un DDR en tête d'installation.

■ Synthèse, choix d'un schéma de liaison à la terre

Sur le plan de la protection des personnes, les trois régimes de neutre sont équivalents si on respecte toutes les règles d'exploitation et d'installation.

Le choix du régime de neutre doit s'effectuer en tenant compte des :

– **caractéristiques de l'installation** ;
– **conditions et impératifs d'exploitation**.

Le choix peut s'effectuer par l'étude de trois étapes successives qui sont :

– cas où le régime de neutre est imposé ;
– problème de la continuité de service ;
– choix en fonction du réseau et des récepteurs.

Tableau 7.6 – Cas des SLT imposés suivant le type d'installation.

Type d'installation	Régime de neutre
Bâtiment alimenté par un réseau de distribution publique	TT
Établissement d'enseignement avec locaux de TP	TT
Salles d'opération, hôpitaux, cliniques	IT
Circuits de sécurité (éclairage) soumis au décret de protection des travailleurs	IT
Mines et carrières	IT ou TT

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Choix en fonction des impératifs d'exploitation

Tableau 7.7 – Cas des SLT imposés suivant les contraintes d'exploitation de l'installation.

		Continuité de service impérative	
		OUI	NON
Entretien assuré par un personnel électricien qualifié	OUI	IT	IT / TT / TN D'autres critères interviennent
	NON	Aucun régime n'est satisfaisant	TT Le plus simple à mettre en œuvre

☐ Choix en fonction du réseau et des récepteurs

Tableau 7.8 – Cas des SLT conseillés suivant le réseau et les récepteurs utilisés.

Nature du réseau ou des récepteurs	TT	IT	TN	Observations
Réseau très étendu avec de bonnes prises de terre de masses (10 Ω maxi)	♦	X	O	Au-delà de 10 km, le neutre isolé est déconseillé
Réseau très étendu avec de mauvaises masses (> 30 Ω)	♦	X	X	
Réseau en zone orageuse	O	X	♦	Risques d'amorçage du limiteur de surtension
Réseau avec courants de fuites importants (> 500 mA)	O	X	♦	Risque de déclenchement des différentiels en TT
Réseau avec lignes aériennes extérieures	♦	X	O	En IT, l'isolement est incertain à cause de l'humidité
Groupe électrogène de secours	O	♦	X	En TN, risque de détérioration de l'alternateur si défaut interne
Récepteurs sensibles aux grands courants de défauts (moteurs)	O	♦	X	*Id* en TN peut être très important
Récepteurs à faible isolement (fours, thermoplongeurs, soudeuses…)	O	O	♦	Utilisation d'un transfo d'isolement avec mise au neutre locale
Récepteurs monophasés (semi-fixes, mobiles)	♦	X	X	Risque de diminution de l'isolement des appareils
Récepteurs à risques : palans, convoyeurs…	O	X	♦	Utilisation d'un transfo d'isolement avec mise au neutre locale
Machines outils…	X	O	♦	Utilisation d'un transfo d'isolement avec mise au neutre locale

X : déconseillé O : possible ♦ : conseillé

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

7.4.3 Test de disjoncteur différentiel

■ **En TN/IT**

Lorsque la condition *I* magnétique < *ID*MAX n'est pas respectée on peut :

– choisir une courbe de déclenchement B ;
– augmenter la section des câbles ;
– utiliser un dispositif différentiel ;
– abaisser la tension de contact en réalisant des liaisons équipotentielles supplémentaires (mais cela reste coûteux et parfois impossible).

■ **Conditions de vérification en schéma TT**

Rappel du tableau précédemment présenté : *tableau 7.9*.

Tableau 7.9 – Sensibilités des différentiels en fonction de *RU* et du type de local.

Courant nominal du dispositif différentiel : IDN (sensibilité)	Résistances maximales de la prise de terre des masses *RU* (en Ω)	
	UL = 50 V (tension limite admissible sur la masse en défaut)	*UL* = 25 V
20 A	2,5	1,25
10 A	5	2,5
1 A	50	25
500 mA	100	50
300 mA	167	83
100 mA	500	250
30 mA	1 670	835
6 mA	8 300	4 150

Schémas de liaisons à la terre TN et IT :

Résistance *R* entre masse et liaison équipotentielle principale : $R \leq \dfrac{U_0}{2K.It}$

U_0 = 230 V
K = 1 dans un TN
$K = 2/\sqrt{3}$ en schéma IT lorsque le neutre n'est pas distribué.
K = 2 en schéma IT lorsque le neutre est distribué.
It courant de fonctionnement du dispositif de protection dans le temps prescrit.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Applications :

– Test de disjoncteur différentiel haute sensibilité 30 mA monophasé ou triphasé dans un tableau.
– Mesure de la tension de contact (0-200 V maxi) sans faire disjoncter les dispositifs différentiels.
– Contrôle du circuit de protection dans les réseaux triphasés.
– Contrôle synoptique de branchement correct phase/neutre par symboles.

Méthodologie en régime TT :

En vérifiant que les DDR déclenchent à $In < I\Delta n$ dans un temps < 300 ms. Un DDR ne déclenche que sur un défaut phase/neutre (PE).

In courant de test du DDR.

IΔn calibre de sensibilité du DDR (10-30-100-300-500-1 000 mA).

Ud tension de défaut = *U*masse-PE si le courant *IΔn* circulait.

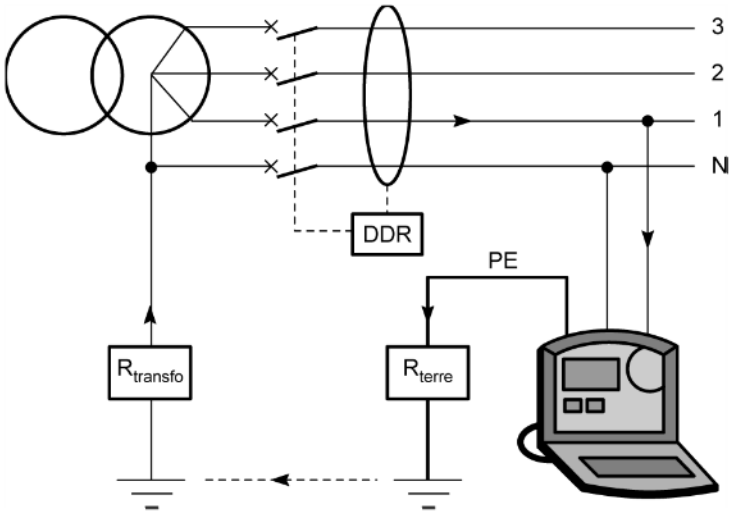


Figure 7.24 – Test du DDR en TT.

Mesures possibles

– La tension de défaut : essai avec $I < 50$ % de la résistance de la boucle et de la tension de défaut ($Ud = R\text{boucle}.I\Delta n$).
– Non-déclenchement à 50 % *IΔn* : essai avec un courant constant égal à 50 %.
– Temps de déclenchement : essai avec un courant constant égal à *IΔn*, 2 *IΔn*, ou 5 *IΔn*.
– Courant de déclenchement : essai avec une rampe de courant allant de 50 % *IΔn* à $In > I\Delta n$.

Applications possibles

Voir *figure 7.25*.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

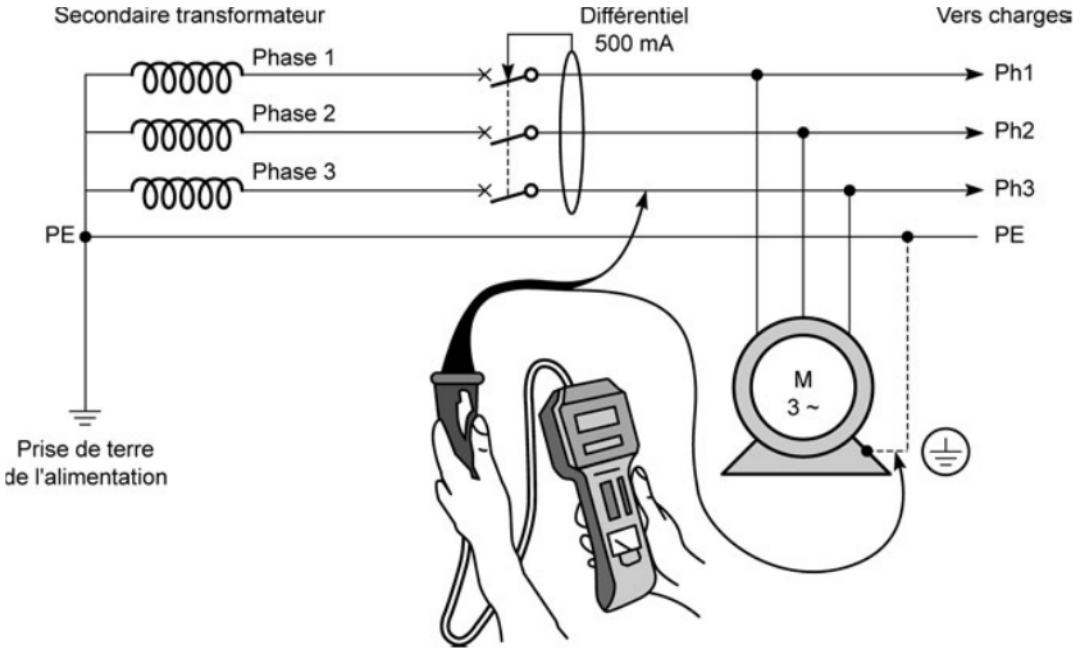


Figure 7.25 – Test de différentiel 3 phases sans neutre.

Appareillages

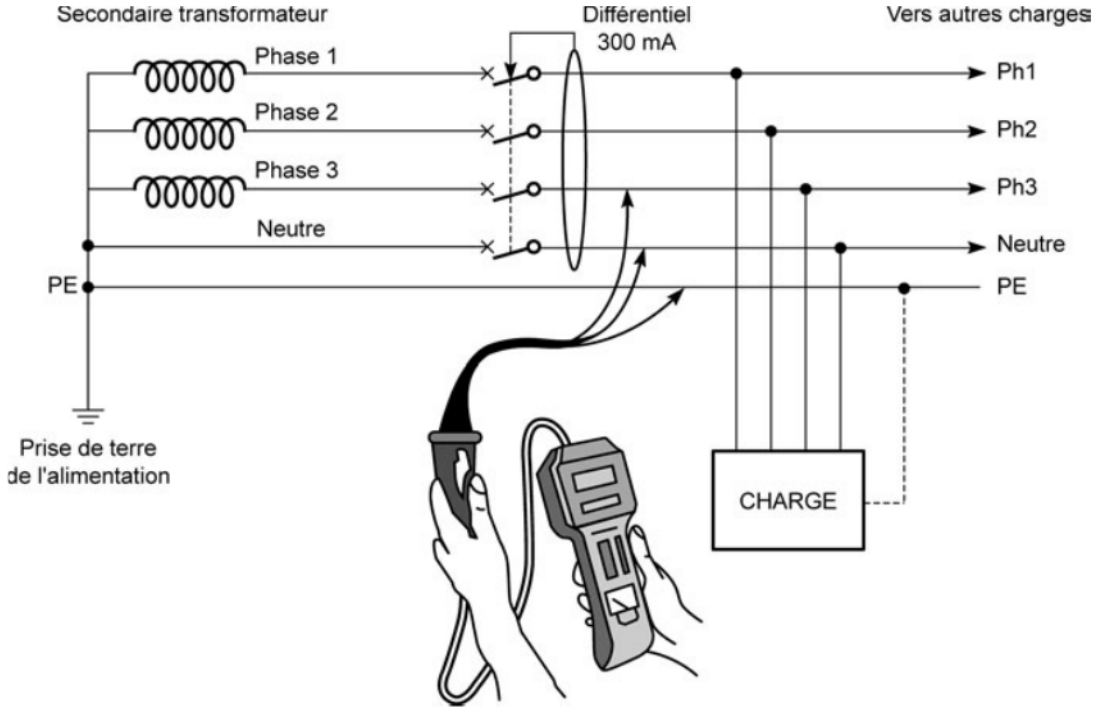


Figure 7.26 – Test de différentiel 3 phases avec neutre (4 fils).

Le contrôleur de disjoncteurs différentiels C.A 6001 est adapté aux besoins des organismes de contrôles comme aux installateurs et surtout aux électriciens de maintenance dans le tertiaire comme dans l'industrie travaillant sur des installations BT.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

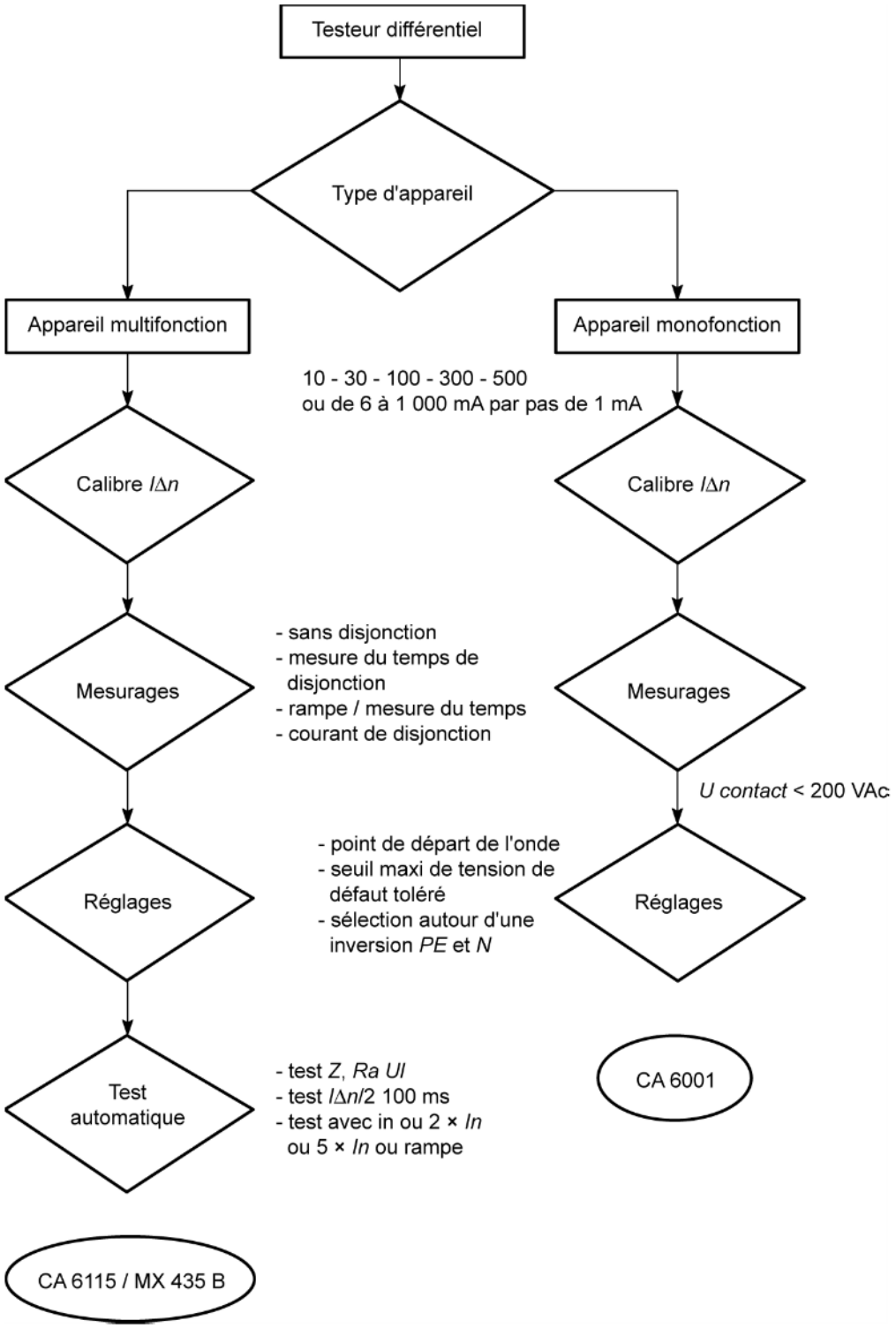


Figure 7.27 – Aide au choix d'un testeur de différentiel.

Vous trouverez sur le site web de Chauvin Arnoux les documentations techniques des appareils dédiés aux tests de différentiels comme les appareils polyvalents intégrant cette mesure.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

7.5 Mesure de courant de court-circuit

7.5.1 Définitions

Un courant de court-circuit est un courant provoqué par un défaut d'impédance négligeable entre des points d'installation présentant normalement une différence de potentielle.

Courant de court-circuit crête (*Icc* crête) : correspond à la valeur extrême de l'onde, générant des forces électrodynamiques élevées notamment au niveau des jeux de barres et des contacts ou connexions d'appareillage.

Courant de court-circuit efficace (*Icc* eff) : valeur efficace du courant de défaut qui provoque des échauffements dans des appareils et les conducteurs et qui porte les masses des matériels électriques à un potentiel dangereux.

Courant de court-circuit minimum (*Icc* mini) : valeur efficace du courant de défaut s'établissant dans le circuit d'impédance élevée (conducteur à section réduite et canalisation de grande longueur…) et dont cette impédance a été augmentée par l'échauffement de la canalisation en défaut. il est nécessaire d'éliminer rapidement ce type de défaut dit impédant par des moyens appropriés.

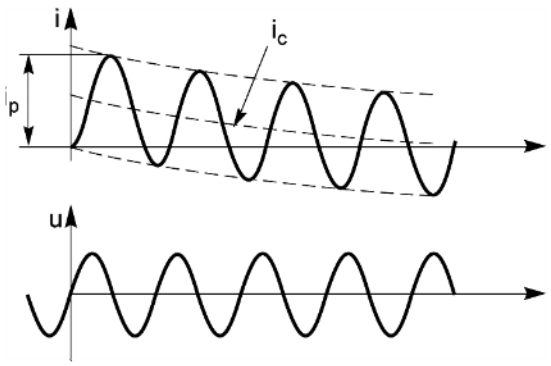


Figure 7.28 – Onde de courant de court-circuit asymétrique.

Apparaît *K*, coefficient d'asymétrie de la forme de l'onde.

7.5.2 Calcul de ce courant de court-circuit

Les calculs de courants de court-circuit ont pour but de :

- déterminer le pouvoir de coupure du dispositif différentiel (*Pdc*) déterminé en fonction du calcul de *Icc* maxi ;
- déterminer la section des conducteurs permettant (dépend de *Icc* mini calculée aux bornes du récepteur) de supporter la contrainte thermique du courant de court-circuit ;
- garantir l'ouverture du dispositif de protection contre les contacts indirects dans le temps prescrit par les normes NFC 15-100 et CEI 364 ;
- déterminer la tenue mécanique des supports de conducteur (efforts électrodynamiques) déterminée en fonction de la valeur de *Icc* crête déduit de *Icc* maxi.

Trois méthodes :

- **Calcul des impédances** : consiste à calculer l'impédance *Z* de la boucle de défaut en tenant compte de l'impédance de la source d'alimentation (réseau, batteries,

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

groupe…). Cette méthode est précise et permet de calculer en même temps *Icc* maxi et *Icc* mini mais nécessite la connaissance des paramètres du circuit en défaut : voir ci-après.

– **Rapide** : s'applique dans tous les cas où les paramètres du circuit de défaut ne sont pas tous connus. Le courant de court-circuit est déterminé en un point du réseau, connaissant *Icc* amont ainsi que la longueur et la section de raccordement au point amont, cette méthode donne uniquement la valeur maxi de *Icc*.
– **Conventionnelle** : permet de calculer *Icc* mini, voir ci-dessous.

Calcul des courants de courts-circuits par la méthode des impédances : *tableaux 7.10 et 7.11*.

Tableau 7.10 – Méthode Schneider par calcul.

Icc en un point quelconque de l'installation

Déterminer résistances et réactances de chaque partie de l'installation

partie de l'installation	valeurs à considérer résistances (mΩ)	réactances (mΩ)
réseau amont(1)	R1 = 0,1 x Q	X1 = 0,995 Z_Q $Z_Q = \frac{(m\ U_n)^2}{S_{KQ}}$
tranformateur	$R2 = \frac{Wc \times U^2}{S^2} 10^{-3}$ Wc = pertes cuivre (W)(2) S = puissance apparente du transformateur (kVA)	$X2 = \sqrt{Z^2{}_2 - R^2{}_2}$ $Z = \frac{Ucc}{100} \times \frac{U^2}{S}$ Ucc = tension de court-circuit du transfo (en %)
liaison en câbles(3)	$R3 = \rho \frac{L}{S}$(4) ρ = 18,51 (Cu) ou 29,41 (Al) L en m S en mm²	X3 = 0,09L (câbles uni jointifs) X3 = 0,13L(3) (câbles uni espacés) L en m
en barres	$R3 = \rho \frac{L}{S}$(4) ρ = 18,51 (Cu) ou 29,41 (Al) L en m S en mm²	X3 = 0,15L(5) L en m
disjoncteur		
rapide	R4 négligeable	X4 négligeable
sélectif	R4 négligeable	X4 négligeable

(1) S_{KQ} : puissance de court-circuit du réseau à haute tension en kVA.
(2) Pour les valeurs des pertes cuivre, lire les valeurs correspondantes dans le tableau de la page K77.
(3) Réactance linéique des conducteurs en fonction de la disposition des câbles et des types.
(4) S'il y a plusieurs conducteurs en parallèle par phase diviser la résistance et la réactance d'un conducteur par le nombre de conducteurs.
R est négligeable pour les sections supérieures à 240 mm².
(5) Réactance linéique des jeux de barres (Cu ou AL) en valeurs moyennes.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 7.11 – Méthode Schneider (exemple traité).

Valeur de l'Icc en un point de l'installation par la méthode suivante :
(méthode utilisée par le logiciel Ecodial 3 en conformité avec la norme NF C 15-500).

1. calculer :
la somme Rt des résistances situées en amont de ce point :
Rt = R1 + R2 + R3 + ... et la somme Xt des réactances situées en amont de ce point :
Xt = X1 + X2 + X3 + ...

2. calculer :
$$Icc\ maxi. = \frac{mc\,U_n}{\sqrt{3}\ \sqrt{Rt^2 + Xt^2}}\ kA.$$
Rt et Xt exprimées en mΩ

Important :
- U_n = tension nominale entre phases du transformateur (400 V)
- m = facteur de charge à vide = 1,05
- c = facteur de tension = 1,05.

Exemple

schéma	partie de l'installation	résistances (mΩ)	réactances (mΩ)
	réseau amont S_{KQ} = 500 000 kVA	$R1 = \frac{(1{,}05 \times 400)^2}{500\,000} \times 0{,}1$ R1 = 0,035	$X1 = \frac{(1{,}05 \times 400)^2}{500\,000} \times 0{,}995$ X1 = 0,351
	transformateur S_n = 630 kVA U^{cc} = 4 % U = 420 V P_{cu} = 6 300 W	$R2 = \frac{6\,300 \times 420^2 \times 10^{-3}}{630^2}$ R2 = 2,8	$X2 = \sqrt{\left(\frac{4}{100} \times \frac{420^2}{630}\right)^2 - (2{,}8)^2}$ X3 = 10,84
	liaison (câbles) **transformateur disjoncteur** 3 x (1 x 150 mm²) Cu par phase L = 5 m	$R3 = \frac{18{,}51 \times 5}{150 \times 3}$ R3 = 0,20	$X3 = 0{,}09 \times \frac{5}{3}$ X3 = 0,15
M1	**disjoncteur** rapide	R4 = 0	X4 = 0
1 2 3	**liaison disjoncteur départ** 2 barres (CU) 1 x 80 x 5 mm² par phase L = 2 m	$R5 = \frac{18{,}51 \times 2}{400}$ R5 = 0,09	X5 = 0,15 x 2 X5 = 0,30
M2	**disjoncteur** rapide	R6 = 0	X6 = 0
tableau secondaire M3	**liaison** (câbles) **tableau général BT** tableau secondaire 1 x (1 x 185 mm²) Cu par phase L = 70 m	$R7 = 18{,}51 \times \frac{70}{185}$ R7 = 7	X7 = 0,13 x 70 X7 = 9,1

Calcul des intensités de court-circuit (kA)

résistances (mΩ)	réactances (mΩ)	Icc (kA)
en M1 Rt1 = R1 + R2 + R3 Rt1 = 3,03	Xt1 = X1 + X2 + X3 Xt1 = 11,34	$\frac{1{,}05 \times 1{,}05 \times 400}{\sqrt{3}\ \sqrt{(3{,}03)^2 + (11{,}34)^2}} = 21{,}70$ kA
en M2 Rt2 = Rt1 + R4 + R5 Rt2 = 3,12	Xt2 = Xt1 + X4 + X5 Xt2 = 11,64	$\frac{1{,}05 \times 1{,}05 \times 400}{\sqrt{3}\ \sqrt{(3{,}12)^2 + (11{,}64)^2}} = 21{,}20$ kA
en M3 Rt3 = Rt2 + R6 + R7 Rt3 = 10,12	Xt3 = Xt2 + X6 + X7 Xt3 = 20,74	$\frac{1{,}05 \times 1{,}05 \times 400}{\sqrt{3}\ \sqrt{(10{,}12)^2 + (20{,}74)^2}} = 11{,}05$ kA

■ Document Schneider

Le calcul d'*Icc* crête permet de connaître les efforts électrodynamiques sur les jeux de barres.

$$Ip = K.\sqrt{2}.Icc$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Méthode rapide : cette méthode permet de connaître en tout point du réseau les valeurs du courant de court-circuit de façon approximative connaissant *Icc* amont ainsi que la longueur et la section de raccordement au point amont (suivant le guide UTE-15-105).

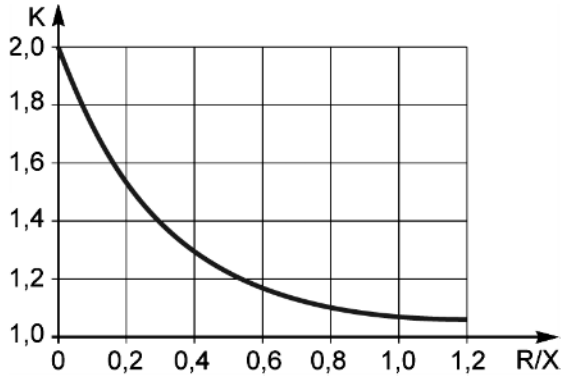


Figure 7.29 – Courbe $K = f(R/X)$ (d'après Schneider).

Le *tableau 7.12* est valable pour les réseaux de tension entre phases 400 V (avec ou sans neutre).

Comment procéder ?

Dans la partie numérotée 1 du *tableau 7.12* (conducteurs cuivre) ou numérotée 3 (conducteur aluminium), se placer sur la ligne correspondant à la section des conducteurs de phase. Avancer ensuite dans la ligne jusqu'à la valeur immédiatement inférieure à la longueur de la canalisation.

Descendre (cuivre) ou monter (aluminium) verticalement jusqu'à trouver la partie numérotée 2 du *tableau 7.12* et s'arrêter à la ligne correspondant à *Icc* amont. La valeur lue à l'intersection est la valeur de Icc recherchée.

Exemple : *Icc* amont = 20 kA, canalisation 3×35 mm^2 cuivre, longueur de 17 m dans la ligne 50 mm^2, la longueur inférieure à 17 m est 15 m. L'intersection de la colonne 15 m et de la ligne 20 kA donne *Icc* aval = 11 kA.

Calcul par la méthode conventionnelle : elle permet d'obtenir la valeur de *Icc* mini à l'extrémité d'une installation qui n'est pas alimentée par un alternateur.

$$Icc = A\,\frac{0{,}8\,U.\,S}{2\rho\,L}$$

U : tension entre phases en V.

L : longueur en m de la canalisation.

S : section des conducteurs en mm^2.

ρ = 0,027 mΩ.m pour le cuivre ou 0,043 mΩ.m pour l'aluminium.

A = 1 pour les circuits sans neutre

A = 0,58 pour les circuits avec neutre (section phase = section neutre)

A = 0,38 pour les circuits avec neutre (section neutre = section phase/2)

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 7.12 – Calcul rapide de courant de court-circuit.

	SECTION DES CONDUCTEURS DE PHASE (mm²)	LONGUEUR DE LA CANALISATION EN m																							
Cuivre	1,5														0,8	1	1,3	1,6	3	6,5	8	9,5	13	16	32
	2,5													1	1,3	1,6	2,1	2,6	5	10	13	16	21	26	50
	4												0,8	1,7	2,1	2,5	3,5	4	8,5	17	21	25	34	42	85
	6												1,3	2,5	3	4	5	6,5	13	25	32	38	50	65	130
	10										0,8	1,1	2,1	4	5,5	6,5	8,5	11	21	42	55	65	85	110	210
	16								0,9	1	1,4	1,7	3,5	7	8,5	10	14	17	34	70	85	100	140	170	340
	25							1	1,3	1,6	2,1	2,6	5	10	13	16	21	26	50	100	130	160	210	260	
	35							1,5	1,9	2,2	3	3,5	7,5	15	19	22	30	37	75	150	190	220	300	370	
	50						1,1	2,1	2,7	3	4	5,5	11	21	27	32	40	55	110	210	270	320			
	70						1,5	3	3,5	4,5	6	7,5	15	30	37	44	60	75	150	300	370				
1	95				0,9	1	2	4	5	6	8	10	20	40	50	60	80	100	200	400					
	120		0,9	1	1,1	1,3	2,5	5	6,5	7,5	10	13	25	50	65	75	100	130	250						
	150	0,8	1	1,1	1,2	1,4	2,7	5,5	7	8	11	14	27	55	70	80	110	140	270						
	185	1	1,1	1,3	1,5	1,6	3	6,5	8	9,5	13	16	32	65	80	95	130	160	320						
	240	1,2	1,4	1,6	1,8	2	4	8	10	12	16	20	40	80	100	120	160	200	400						
	300	1,5	1,7	1,9	2,2	2,4	5	9,5	12	15	19	24	49	95	120	150	190	240							
	2 X 120	1,5	1,8	2	2,3	2,5	5,1	10	13	15	20	25	50	100	130	150	200	250							
	2 X 150	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8	5,5	11	14	17	22	28	55	110	140	180	220	280							
	2 X 185	2	2,3	2,6	2,9	3,5	6,5	13	16	20	26	33	65	130	160	200	260	380							
	3 X 120	2,3	2,7	3	3,5	4	7,5	15	19	23	30	38	75	150	190	230	300	380							
	3 X 150	2,5	2,9	3,5	3,5	4	8	16	21	25	33	41	80	160	210	250	330	410							
	3 X 185	2,9	3,5	4	4,5	5	9,5	20	24	29	39	49	95	190	240	290	390								
	Icc AMONT (kA)	Icc AU POINT CONSIDERE (kA)																							
Icc	100	94	94	93	92	91	83	71	67	63	56	50	33	20	17	14	11	9	5	2,4	2	1,6	1,2	1	0,5
	90	85	85	84	83	83	76	66	62	58	52	47	32	20	16	14	11	9	4,5	2,4	2	1,6	1,2	1	0,5
	80	76	76	75	75	74	69	61	57	54	49	44	31	19	16	14	11	9	4,5	2,4	2	1,6	1,2	1	0,5
	70	67	67	66	66	65	61	55	52	49	45	41	29	18	16	14	11	9	4,5	2,4	1,9	1,6	1,2	1	0,5
	60	58	58	57	57	57	54	48	46	44	41	38	27	18	15	13	10	8,5	4,5	2,4	1,9	1,6	1,2	1	0,5
	50	49	48	48	48	48	46	42	40	39	36	33	25	17	14	13	10	8,5	4,5	2,4	1,9	1,6	1,2	1	0,5
	40	39	39	39	39	39	37	35	33	32	30	29	22	15	13	12	9,5	8	4,5	2,4	1,9	1,6	1,2	1	0,5
	35	34	34	34	34	34	33	31	30	29	27	26	21	15	13	11	9	8	4,5	2,3	1,9	1,6	1,2	1	0,5
	30	30	29	29	29	29	28	27	26	25	24	23	19	14	12	11	9	7,5	4,5	2,3	1,9	1,6	1,2	1	0,5
2	25	25	25	25	24	24	24	23	22	22	21	20	17	13	11	10	8,5	7	4	2,3	1,9	1,6	1,2	1	0,5
	20	20	20	20	20	20	19	19	18	18	17	17	14	11	10	9	7,5	6,5	4	2,2	1,8	1,5	1,2	1	0,5
	15	15	15	15	15	15	15	14	14	14	13	13	12	9,5	8,5	8	7	6	4	2,1	1,8	1,5	1,2	0,9	0,5
	10	10	10	10	10	10	10	9,5	9,5	9,5	9,5	9	8,5	7	6,5	6,5	5,5	5	3,5	2	1,7	1,4	1,1	0,9	0,5
	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6,5	6,5	6,5	6	5,5	5	5	4,5	4	2,9	1,8	1,6	1,3	1,1	0,9	0,5
	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4,5	4	4	4	3,5	3,5	2,5	1,7	1,4	1,3	1,1	0,8	0,5
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3,5	3,5	3,5	3	3	2,9	2,2	1,5	1,3	1,2	1,1	0,8	0,4
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2,9	2,9	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	1,9	1,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,4
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,4	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,4
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,3
	SECTION DES CONDUCTEURS DE PHASE (mm²)	LONGUEUR DE LA CANALISATION EN m																							
Aluminium	25														0,8	1	1,3	1,6	3	6,5	8	9,5	13	16	32
	4													1	1,3	1,6	2,1	2,6	5	10	13	16	21	26	50
	6												0,8	1,6	2	2,4	3	4	8	16	20	24	32	40	60
	10												1,3	2,6	3,5	4	5,5	6,5	13	26	33	40	55	65	130
	16										0,8	1,1	2,1	4	5,5	6,5	8,5	11	21	42	55	65	85	105	210
	25								0,8	1	1,3	1,7	3,5	6,5	8,5	10	13	17	33	65	85	100	130	165	330
	35							0,9	1,2	1,4	1,8	2,3	4,5	59	12	14	18	23	46	90	120	140	180	230	
	50							1,3	1,7	2	2,6	3,5	6,5	13	17	20	26	33	65	130	170	200	260	330	
	70						0,9	1,8	2,3	2,8	3,5	4,5	9	18	23	28	37	46	90	180	230	280	370		
	95						1,3	2,5	3	4	5	6,5	13	25	32	38	50	65	130	250	310	380			
	120					0,8	1,7	3	4	4,5	6,5	8	17	32	40	47	65	80	160	320	400				
3	150					0,9	1,7	3,5	4,5	5	7	8,5	17	34	43	50	70	85	170	340					
	185				0,9	1	2	4	5	6	8	10	20	40	50	60	80	100	200	400					
	240		0,9	1	1,1	1,3	2,5	5	6,5	7,5	10	13	25	50	65	75	100	130	250						
	300	0,9	1	1,2	1,4	1,5	3	6	7,5	9	12	15	30	60	75	90	120	150	300						
	2 x 120	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	3	6,5	8	9,5	13	16	32	65	80	95	130	160	320						
	2 x 150	1	1,2	1,4	1,5	1,7	3,5	7	9	10	14	17	35	70	85	100	140	170							
	2 x 185	1,2	1,4	1,6	1,8	2	4,1	8	10	12	16	20	41	80	100	120	160	200							
	2 x 240	1,5	1,8	2	2,3	2,5	5	10	13	15	20	25	50	100	130	150	200	250							
	3 x 120	1,4	1,7	1,9	2,1	2,4	4,5	9,5	12	14	19	24	48	95	120	140	190	240							
	3 x 150	1,5	1,8	2,1	2,3	2,6	5	10	13	15	21	26	50	100	130	150	210	260							
	3 x 185	1,8	2,1	2,4	2,7	3	6	12	15	18	24	30	60	120	150	180	240	300							
	3 x 240	2,3	2,7	3	3,5	4	7,5	15	19	23	30	38	75	150	190	230	300	380							

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Objectif de la mesure du courant de court-circuit : déterminer la contrainte thermique I^2t maximale dégagée par le court-circuit en vue de choisir les câbles ou de vérifier si le choix des câbles est conforme.

Tableau 7.13 – Contraintes thermiques admissibles par les câbles en fonction de leur section et du matériau utilisé (Schneider).

	5 mm²	1,5	2,5	4	6	10	15	25	35	50
PVC	Cu	$2{,}97 \times 10^4$	$8{,}26 \times 10^4$	$2{,}12 \times 10^5$	$4{,}76 \times 10^5$	$1{,}32 \times 10^6$	$3{,}4 \times 10^6$	$8{,}26 \times 10^6$	$1{,}62 \times 10^7$	$3{,}31 \times 10^7$
	Al					$5{,}41 \times 10^5$	$1{,}39 \times 10^6$	$3{,}38 \times 10^6$	$6{,}64 \times 10^6$	$1{,}35 \times 10^7$
PRC	Cu	$4{,}10 \times 10^4$	$1{,}39 \times 10^5$	$2{,}92 \times 10^5$	$6{,}56 \times 10^5$	$1{,}82 \times 10^6$	$4{,}69 \times 10^6$	$1{,}39 \times 10^7$	$2{,}23 \times 10^7$	$4{,}56 \times 10^7$
	Al					$7{,}52 \times 10^5$	$1{,}93 \times 10^6$	$4{,}70 \times 10^6$	$9{,}23 \times 10^6$	$1{,}88 \times 10^7$
Effets thermiques Échauffement moins important au niveau des conducteurs, donc durée de vie augmentée pour les câbles										
Effets mécaniques Forces de répulsion électrodynamiques réduites donc moins de risques de déformation ou de rupture au niveau des contacts électriques										
Effets électromagnétiques Moins d'influence sur les appareils de mesure situés à proximité d'un circuit électrique										

Les valeurs des sections sont exprimées en mm² et les contraintes thermiques en A².s.

Pouvoir choisir le *Pdc* d'un disjoncteur en fonction du courant de court-circuit sachant que *Pdc* > *Icc*.

Vérifier le bon fonctionnement des protections suivant le régime de neutre utilisé :

En régime TT : la mesure visera à tester les différentiels (DDR) se reporter en début de chapitre 7.

En régime TN : il faut que *Icc* > *Id* = *U*phase-terre/*Z*boucle.

En régime IT : vérifier le bon fonctionnement des protections en régime de neutre IT. Il faut qu'au deuxième défaut :

– en neutre distribué : *Icc* > *Id* = 50 % *U*phase-terre/*Z*boucle ;
– en neutre non distribué : *Icc* > *Id* = 50 % *U*phase-phase/*Z*boucle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

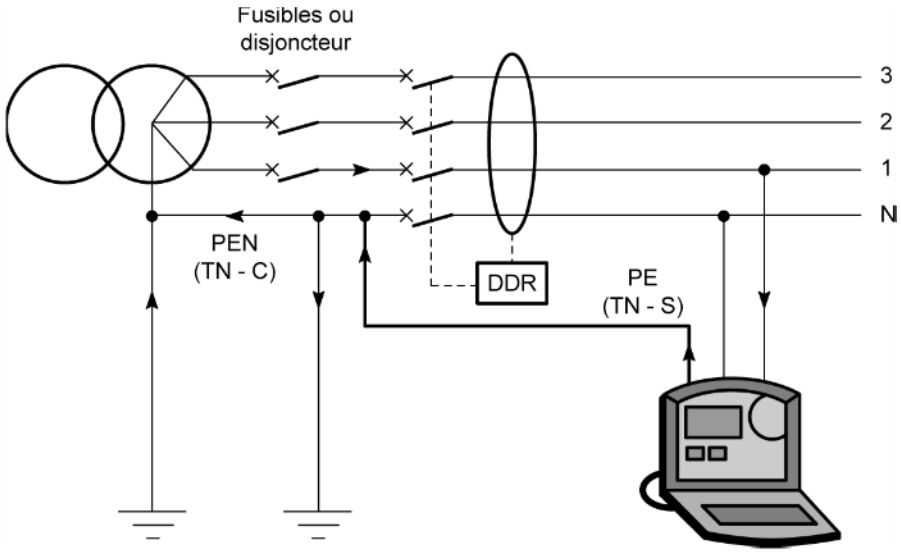


Figure 7.30 – Vérification des disjoncteurs en régime TN.

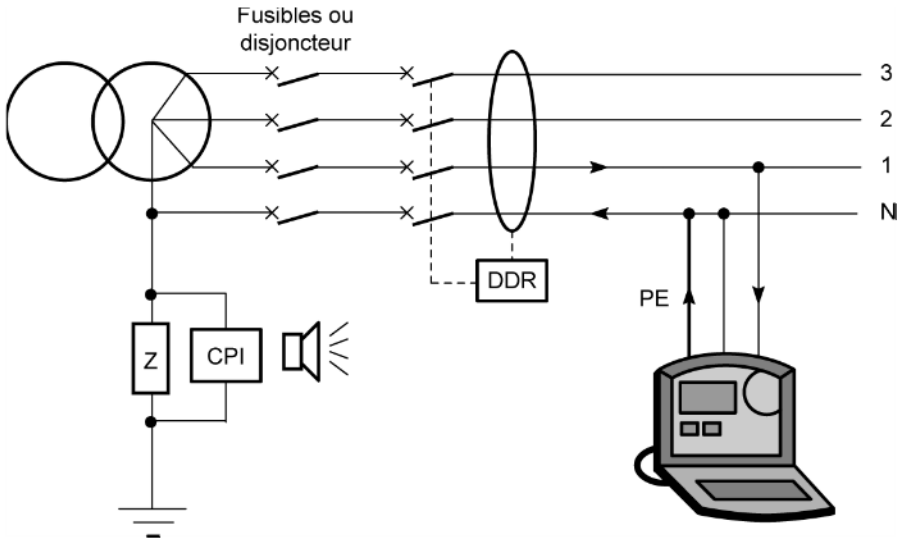


Figure 7.31 – Vérification des disjoncteurs en régime IT.

Méthodologie et mise en service

Voir schéma de raccordement aux *figures 7.30 et 7.31*.

Appareillages

Vous trouverez sur le site web de Chauvin Arnoux les documentations techniques des appareils dédiés aux tests de disjoncteurs (partie magnétique) comme les appareils polyvalents intégrant cette mesure.

Le contrôleur spécial NFC15-100 permet de réaliser toutes les mesures pour la mise en conformité : isolement, différentiel, terre, boucle, continuité, rotation des phases, tension, courant, fréquence. Les caractéristiques essentielles de cet appareil seront traitées dans un chapitre « contrôleur d'installation électrique » vue sa grande polyvalence.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 7.32 – Exemple d'outil de grande polyvalence : C.A 6115.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

8 • MESURE DE COURANT

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Objectif : l'utilisation de l'énergie impose de connaître l'intensité du courant, sa nature, pour définir toute évolution transitoire accidentelle ou normale afin d'assurer la protection des biens et des personnes ainsi qu'une exploitation correcte de l'installation. Les capteurs doivent assurer une indication fiable et représentative de la réelle valeur efficace d'un courant au sein d'une installation électrique.
Nous allons faire une description des différents types de capteurs, de leur principe de fonctionnement et de leur champ d'application dans le domaine de la mesure du courant ainsi que de leur intégration dans les équipements de mesure actuels.

8.1 Capteurs de courant

Les capteurs de courant doivent remplir des conditions d'utilisation précises :

8.1.1 Homothétie et fidélité

L'image fournie par le capteur doit être homothétique de la grandeur mesurée : c'est à partir de l'intensité et la tension que l'on élabore certaines autres grandeurs comme la puissance, le facteur de puissance, etc.
Un capteur est dit fidèle si le facteur de mesure K est constant dans le temps (*figure 8.1*).

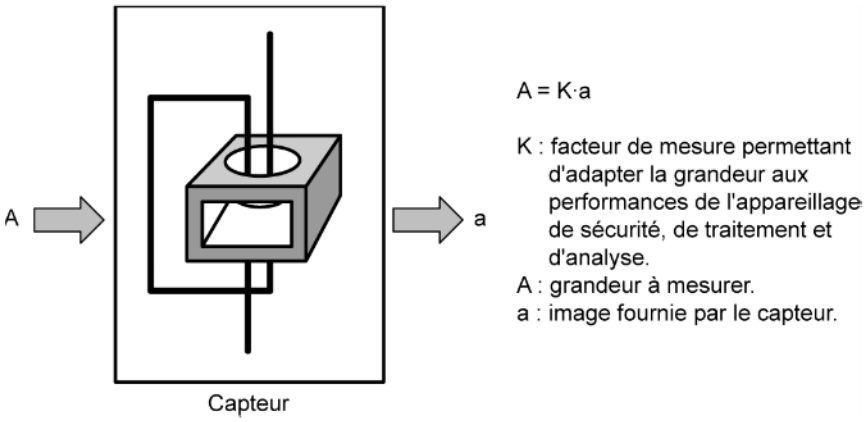


Figure 8.1 – Schéma bloc d'un capteur.

8.1.2 Isolation

Le capteur doit être compatible avec le niveau d'isolation des appareils pour assurer une sécurité d'emploi. En effet aucune perturbation électrique ou électromagnétique présente sur le réseau de puissance ne doit interférer avec la mesure, ou pire encore détruire l'appareil de contrôle.

8.1.3 Adaptation d'impédance

Il faut que l'appareil de contrôle de mesure couplé à un capteur de courant soit compatible avec l'impédance d'entrée du réseau de mesure.

Les capteurs couplés à un appareillage électronique numérique sont de plus en plus fréquents, car ils assurent une bonne adaptation d'impédance en garantissant une puissance apparente consommée très faible par rapport à l'analogique ou à l'électromécanique.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

8.2 Les différents types de capteurs de courant contemporains

8.2.1 Le shunt

Le « shunt » est un conducteur de faible résistance très précis, constitué en général de manganine (alliage de cuivre, nickel, manganèse) ce qui assure une très faible variation en fonction de la température. La plage d'utilisation est de 10 mA (en laboratoire) à 10 kA (dans l'industrie). Il suffit donc de mesurer la tension à ses bornes pour en connaître la valeur du courant la traversant. Généralement la prise de mesure, en tension sur le shunt, est calibrée à 100 mV.

8.2.2 Le transformateur de courant (TC ou parfois TI)

Ce capteur comporte deux circuits électriques et un circuit magnétique. C'est une source de courant qui présente une plage d'utilisation limitée par les phénomènes de saturation magnétique, malgré cela il reste le capteur le plus usité en HTA-HTB.

8.2.3 Le capteur à bobine de Rogowski

Très utilisé en HTA, HTB, il a la particularité d'être linéaire dans une plage d'utilisation assez large car constitué par un tore magnétique non ferromagnétique.

8.2.4 Le capteur à effet Hall

L'élément sensible est un semi-conducteur, appelé cellule de Hall, disposé dans un circuit magnétique pour accroître sa sensibilité.

Ce capteur s'il permet de mesurer un courant alternatif comme un courant continu, est toutefois soumis aux effets de la saturation magnétique, ce qui limite sa plage d'utilisation.

8.2.5 Le TC à flux nul

L'élément sensible est un circuit magnétique dans lequel le flux est annulé par un enroulement auxiliaire et un amplificateur de courant, ce qui permet d'éviter la saturation magnétique. Sa plage est limitée en intensité et en fréquence.

8.2.6 Le capteur à effet Hall à flux nul

C'est un capteur à effet Hall pourvu d'un enroulement auxiliaire chargé d'annuler le flux et d'accroître les effets de la saturation magnétique.

8.2.7 Le capteur optique à effet Faraday

Il s'agit d'une application de l'effet Faraday ; l'élément sensible est soit une fibre optique soit un cristal optique.

8.3 Fonctionnement des capteurs nécessaires à la mesure de courant

8.3.1 Le galvanomètre

Il fonctionne selon le principe du mouvement d'Arsonval, utilisé dans la plupart des ampèremètres à aiguilles (*figure 8.2*). Ce principe repose sur les forces électromagnétiques (forces de Laplace) dues à l'action du flux sur une bobine mobile parcourue par le courant (dispositif à courant continu).

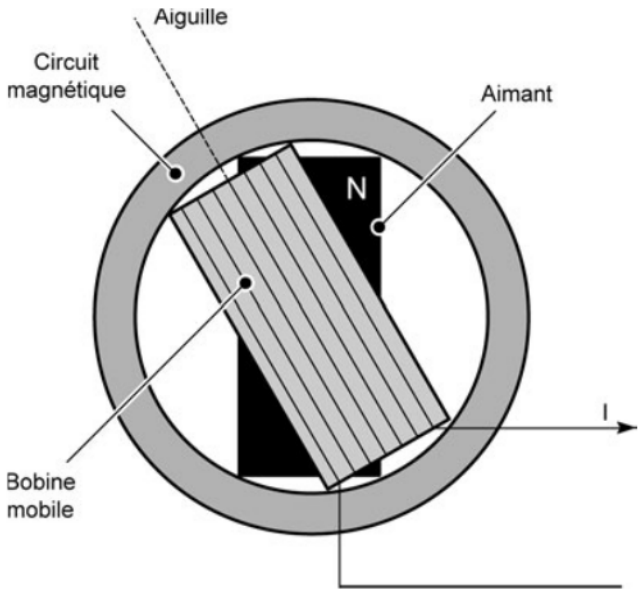


Figure 8.2 – Mouvement d'Arsonval.

La bobine composée de fil fin ne peut traverser que par des courants dont l'intensité n'excède pas 2 mA. Pour les forts courants, la section du fil est plus importante ce qui pose des problèmes de poids, d'encombrement et donc de coût.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

8.3.2 Le shunt

Il effectue la mesure de courant continu indirecte (mesurée par un voltmètre continu) en créant une chute de tension normalisée (60 mV, 100 mV, 200 mV).

La solution la moins coûteuse est le shunt au-delà du milliampère, car la perturbation due à la chute de tension n'est plus négligeable, on utilise alors un millivoltmètre en parallèle sur un shunt (*figure 8.3*). La résistance du shunt est très faible devant celle de l'appareil de mesure.

Im : courant à mesurer.
Ia : courant dans l'appareil de mesure.
Is : courant dans le shunt.
Rap : résistance de l'appareil de mesure.

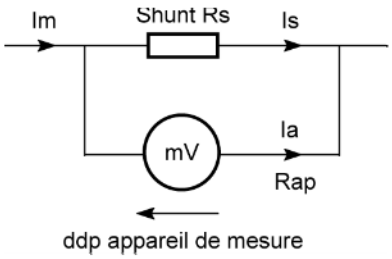


Figure 8.3 – Mesure de tension aux bornes d'un shunt.

Les résistances des shunts sont données par les constructeurs mais les résistances de contact sont très mal définies car elles dépendent du serrage des écrous et de la nature du conducteur, de la corrosion (*figure 8.4*).

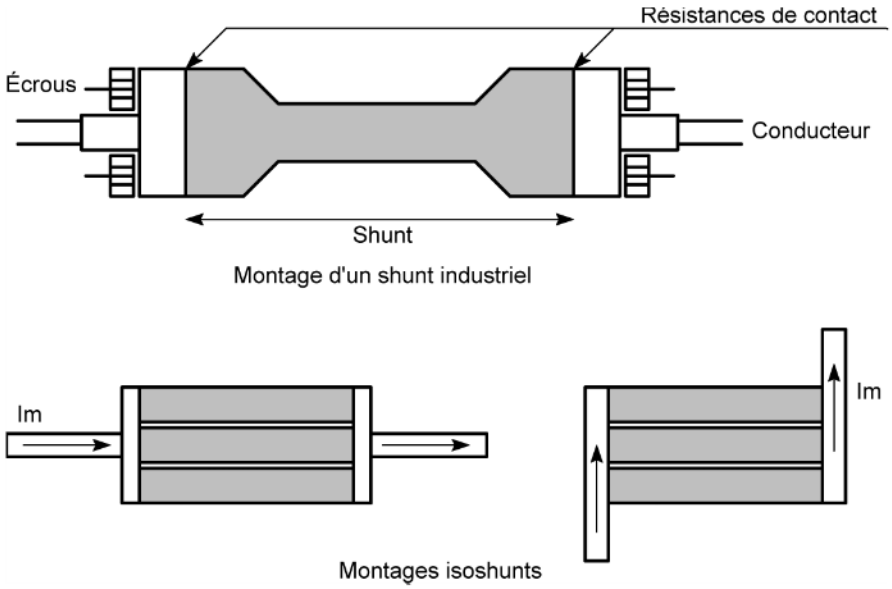
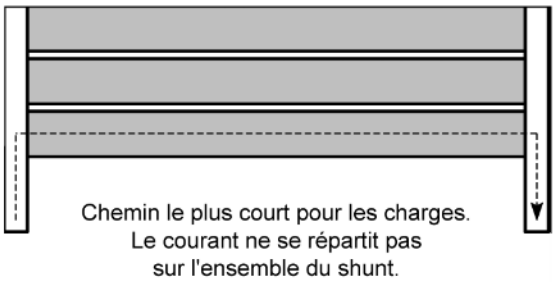


Figure 8.4 – Constitution de différents shunts.

La disposition des shunts est source d'erreur de mesure. Par exemple celui de la *figure 8.5* peut entraîner une erreur de l'ordre de 10 % de *Im* pour 5 000 A, due à la mauvaise répartition du courant : Les charges parcourant le chemin le plus court, la densité est très forte dans le bas du shunt.

Figure 8.5 – Mauvaise répartition du courant dans le shunt.



Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

La puissance à dissiper dans le shunt est dépendante du courant. Pour 1 000 A et 100 mV, le shunt dissipera 100 W, il faudra minimiser les résistances de contact et ventiler le shunt.
Les cordons de mesure donnés à 70 mΩ sont en série avec l'appareil de mesure et doivent être utilisés lors de l'étalonnage de cet appareil car ils peuvent induire une erreur de mesure non négligeable.
Le couplage d'un appareil de mesure à un shunt impose le calcul du courant maximum circulant dans l'appareil de mesure en fonction de la classe de précision du shunt et de cet appareil :

$$Iap = (Im/1\,000) \times (\text{classe de l'appareil} + \text{classe du shunt})$$

En alternatif : les shunts posent des problèmes de tenue en fréquence. Des perturbations par couplage magnétique induites par la source apparaissent sur le circuit de mesure. Cette mutuelle inductance va croître avec la fréquence : c'est ce qui limite la plage d'utilisation du shunt.
Il est conseillé d'utiliser des liaisons torsadées ou coaxiales et d'éloigner l'appareil de mesure de la source.
Les shunts à structure en bande et coaxiale sont les plus utilisés en alternatif (*figures 8.6 et 8.7*).

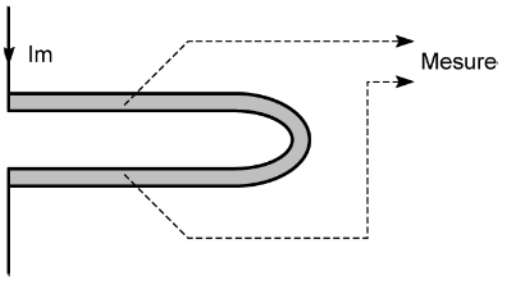


Figure 8.6 – Schéma de principe d'un shunt à structure en bande.

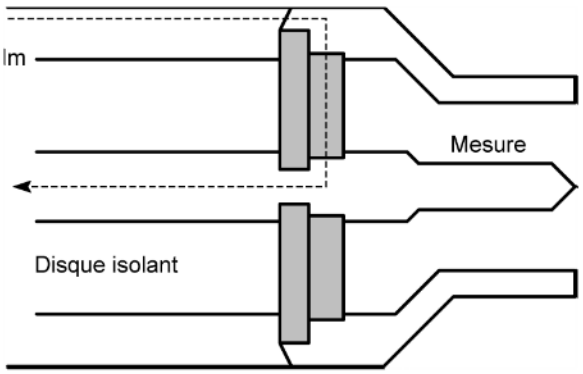


Figure 8.7 – Schéma de principe d'un shunt à structure coaxiale.

La structure coaxiale offre une bande passante plus large par une élimination de l'effet de bord par les disques isolants : le shunt est un disque résistif aux bornes duquel on pratique la mesure.
En courant continu (et plus rarement en AC), il est utilisable de 1 à 6 000 A en 100 mV. Des modèles 60 mV et 150 mV existent également (*figures 8.8 et 8.9*).
L'installation d'un raccord à lames est présentée à la *figure 8.8*.

Figure 8.8 – Shunts à structure en bande à raccord à lames.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

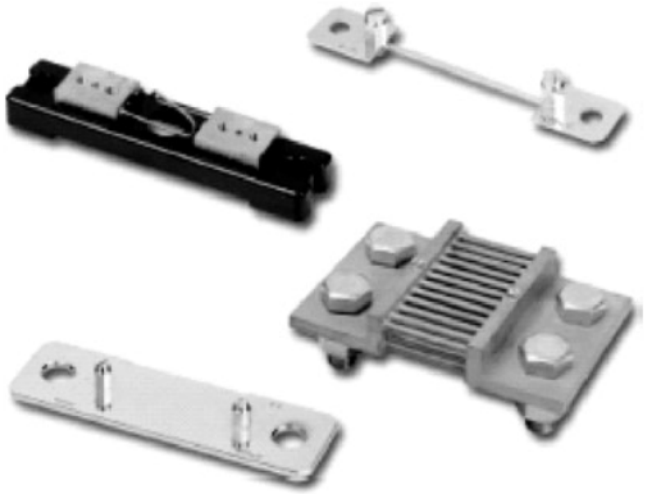


Figure 8.9 – Shunts à structure en bande.

■ **L'installation d'un shunt à raccord de lames**

Prévoir pour une utilisation permanente un calibre 25 % supérieur au courant nominal.

Les surcharges admissibles sont de 1,2 *In* pendant 2 minutes à 10 *In* pendant 5 secondes pour certains modèles.

Veiller à installer le shunt sur le côté masse de l'installation, surtout si celle-ci met en service une tension supérieure à 500 V.

Ces shunts sont réalisés en manganine, matériau offrant une stabilité à long terme et un très faible coefficient de température, mais il faut éviter tout dépassement des 100 °C.

On obtient un meilleur échange thermique en montant le shunt horizontalement, lames orientées verticalement. Si les barres d'arrivée de courant ne permettent pas un refroidissement suffisant, il faut prévoir une ventilation forcée.

Pour un calibrage particulier, on est amené à placer en parallèle des shunts de même type au moyen de barrettes en cuivre. Attention aux cordons de plus de 1,5 m, dont l'influence (résistance) n'est pas négligeable. La précision est donnée pour une température ambiante donnée (de 15 à 30 °C).

8.3.3 Le transformateur de courant

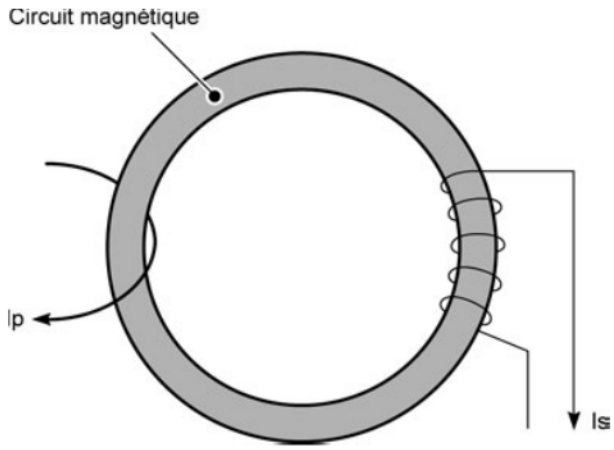


Figure 8.10 – Transformateur de courant.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Le transformateur de courant (TC) est composé d'un tore ferromagnétique parcouru par un champ magnétique image du courant à mesurer (*figures 8.10 et 8.11*).
Pour les fortes intensités, le primaire n'est autre que le câble portant la grandeur, le secondaire est parcouru par la même intensité de courant au rapport k près.
Pour les faibles intensités, on crée un enroulement de N_1 spires formant le primaire.
Le tore a une grande perméabilité et, en travaillant en faible induction (0,1 T), assure un transfert des courants : $N_1 . I_1 + N_2 . I_2 = 0$.

Les primaires bobinés

Faibles intensités au primaire, puissance de charge élevée pour alimenter de nombreux instruments de mesure ou pour transmettre la mesure à longue distance, isolements des appareils, élévation d'intensité. Telles sont les applications nécessitant l'utilisation de transformateurs à primaire bobiné.

Les mixtes et passages de barres

Passages à empreintes multiples pour câbles et barres en version JVO 25 CR DIL, JVO 32 CR et JVPS 10 CR ou passages largement dimensionnés pour les JVP 824, JVP 1025, JVP 1045 et JVP 1260.
Ces transformateurs s'adaptent sur toutes les barres jusqu'à 125 mm pour des intensités primaires de 75 à 5 000 A.

Les passages de câbles

Une gamme complète dédiée au passage des câbles de diamètre extérieur 12 mm à 88 mm pour des intensités primaires de 40 à 1 500 A.

Les tores ouvrants

Les tores ouvrants sont commercialisés par Enerdis, filiale du groupe Chauvin-Arnoux. Ils sont spécifiquement développés pour être facilement insérés dans une installation existante. L'utilisateur appréciera également la possibilité de mettre ces transformateurs en œuvre sans interruption supplémentaire lorsqu'il s'agit d'intervenir sur une installation en fonctionnement. Ils sont équipés d'un cache bornes imperdable et de double-borne pour le court-circuitage du secondaire, ils sont disponibles en trois tailles différentes pour des intensités au primaire pouvant atteindre 5 000 A.

Figure 8.11 – Différentes constitutions de transformateur de courant.

Le TC fonctionnant comme un transformateur en court-circuit, donc à I_0 très faible, on peut négliger les pertes fer car la réluctance est très faible (*figures 8.12 et 8.13*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

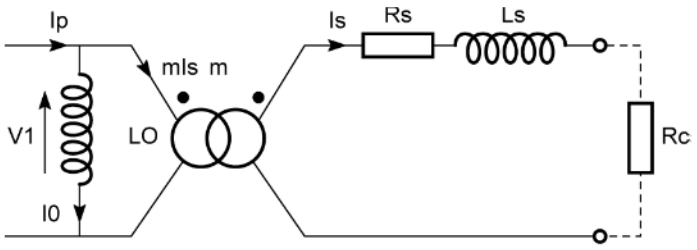


Figure 8.12 – Schéma équivalent du TC.

Ip : courant primaire
I0 : courant magnétisant
Is : courant secondaire
Rc : résistance de l'appareil

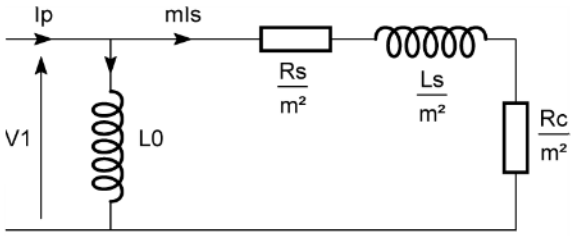


Figure 8.13 – Schéma équivalent ramené côté primaire.

On cherche Ip en fonction de Is.

Les TC sont des transformateurs de haute précision,
V1 est très petit par rapport aux tensions de lignes.

Les TC sont des transformateurs de haute précision.
V_1 est très petit par rapport aux tensions de lignes.

■ Précautions d'emploi

Un transformateur de courant doit toujours travailler en secondaire en court-circuit et ne pas être équipé de fusible, pour que les ampères-tours primaires soient neutralisés par les ampères-tours secondaires.
Si $N_2 . I_2 = 0$ et que $I_1 > 0$, l'induction dans le tore augmente, provoquant un accroissement de la tension, des pertes fer, donc un échauffement destructeur.
En cas d'ouverture $m . Is = 0$ donc V_1 augmente aux bornes de L_0 car I_0 augmente (*figure 8.14*).

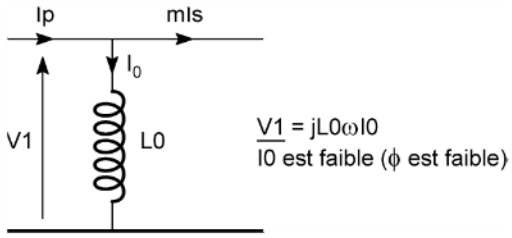


Figure 8.14 – Schéma équivalent en cas d'ouverture du secondaire du TC.

Comme le TC est élévateur de tension, une très grande tension traverse les enroulements secondaires de fils fins ayant une faible isolation, et ils sont susceptibles de claquer.
Point essentiel, le TC est le seul capteur à bénéficier d'une normalisation internationale, la CEI (185 et 186) définissant l'emploi des TC dans l'industrie :

– courants primaires : 5, 80 ou 5 000 A suivant les modèles et les constructeurs ;
– courants secondaires : deux valeurs normalisées : 1 A et 5 A.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Pourquoi ces deux valeurs de courants de sortie 1 A et 5 A ?
La consommation des câbles est à prendre en compte pour définir la puissance du TC afin d'assurer un bon fonctionnement de la chaîne de mesure.
En cas de forte longueur, il faut prendre une sortie 1 A (*tableau 8.1*).

Tableau 8.1 – Pertes dans les câbles en VA en fonction de la longueur et de la section pour les deux calibres des TC 1 A et 5 A.

TC 5 A		Longueur (en m)						
		1	2	5	10	20	50	100
Section (en mm²)	1,0	0,89	1,79	4,46	8,93	17,9	44,6	89,3
	2,5	0,36	0,71	1,79	3,57	7,14	17,9	35,7
	4,0	0,22	0,45	1,12	2,23	4,46	11,2	22,3
	6,0	0,15	0,30	0,74	1,49	2,98	7,44	14,9
	10	0,09	0,18	0,45	0,59	1,79	4,46	8,93

TC 1 A		Longueur (en m)						
		1	2	5	10	20	50	100
Section (en mm²)	1,0	0,04	0,07	0,18	0,36	0,71	1,79	3,57
	2,5	0,01	0,03	0,07	0,14	0,29	0,79	1,43
	4,0	-	0,02	0,04	0,09	0,18	0,45	0,89
	6,0	-	-	0,03	0,06	0,12	0,30	0,60
	10	-	-	0,02	0,04	0,07	0,18	0,36

Pertes en VA : L est la longueur simple en m entre le TC et l'indicateur de mesure, S est la section du câble en mm^2.

$$\text{pertes} = \frac{2I^2}{S \times 56} L \qquad \text{voir } \textit{tableau 8.1}$$

On peut adapter un rapport de transformation inférieur aux valeurs normalisées à l'aide d'un TC à câbles passants, ayant un courant primaire plus élevé à la place d'un TC bobiné, ceci en faisant passer la ligne primaire plusieurs fois au travers du TC (*figures 8.15* et *tableau 8.2*).

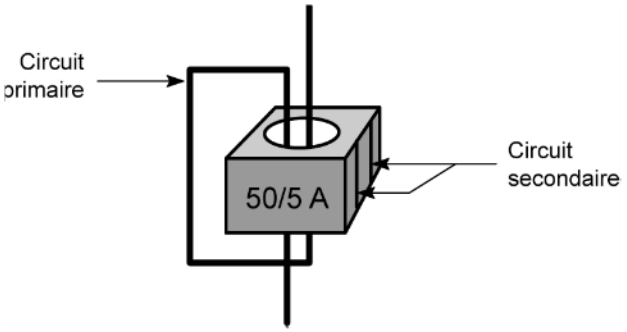


Figure 8.15 – Schéma de principe d'un TC.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 8.2 – Nombre de passages à réaliser en fonction du calibre du TC et du courant réel primaire à mesurer.

Courant primaire à mesurer	Nombre de passages
50 A	1
25 A	2
10 A	5
5 A	10

Les différents types de transformateurs de courant, hormis le transformateur saturable de courant, qui associé à un relais différentiel thermique, garantit une sécurité optimale grâce à une courbe de saturation définie en fonction du relais du montage 2 ou 3 TC (soit à 4 *In* ou à 1,5 *In* pour les démarrages sévères, par exemple pour les ventilateurs sans registres).

Remarque

Attention lors de la mise en œuvre du TC bobiné, il a un sens de connexion ; le sens de bobinage est repéré par un point et doit recueillir le conducteur adéquat pour respecter la formation des ampères-tours.

Caractéristiques

Fréquences nominales : 50 et 400 Hz.

Puissances apparentes disponibles au secondaire : de 2,5 à 100 VA, le transformateur de courant étant destiné à alimenter des appareils de mesures, des compteurs, des relais… il est intéressant de connaître l'ordre de grandeur des consommations usuelles de ces récepteurs.

Erreurs de déphasage en fonction de la charge exprimées en minute d'angle, n'est autre que l'argument de $I_{\text{secondaire}}$ (*Is*) moins l'argument de I_{primaire} (*Ip*).

Erreurs de rapport : le rapport *Kn* est défini par le quotient *Ip*/*Is*. Du fait des imperfections des TC le rapport de transformation réel *K* est différent de *Kn*. L'erreur est définie en % :

$$\varepsilon = \frac{100\, Kn(Is - Ip)}{Ip}$$

Précision : elle spécifie et évalue les performances ainsi que les domaines d'utilisation.

Charge de précision : c'est la valeur de la charge pour laquelle les conditions de précision sont remplies. Elle est caractérisée par la puissance apparente absorbée au secondaire à un facteur de puissance donné. Les charges de précision s'échelonnent entre 2,5 à 30 VA.

Classe de précision : elle est caractérisée par un nombre égal à la limite supérieure de l'erreur pour la grandeur primaire et la charge de précision (exprimée en %). Il en existe deux classes :

– la classe de mesure, pour les erreurs faibles, à domaine restreint ;
– la classe de protection, pour les erreurs plus importantes, pour un domaine étendu.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Pour les TC destinés à la protection, l'indice de la classe est suivi de la lettre P ; cette lettre est suivie du facteur de limite de précision. Par exemple, le TC 5P20 présente une erreur de rapport de 5 % sur une plage de courant variant de *Ip* à 20 fois *Ip*.

Influences externes :

– L'*influence de la charge.* C'est la principale cause de la variation de l'erreur. Les limites de la classe de précision doivent être définies pour une charge variant de 25 % à 100 % de la charge de précision.
– L'*influence de la fréquence.* La précision doit être tenue lorsque la fréquence varie dans les limites imposées par le cahier des charges.
– L'*influence du conducteur primaire.* La répartition du champ n'étant pas uniforme, afin d'éliminer l'induction de I+, on ajoute un enroulement de compensation.

Régime transitoire : l'induction rémanente s'ajoutant à celle créée par le courant en cours d'établissement, il faut prendre en compte ce phénomène d'hystérésis (*figure 8.16*).

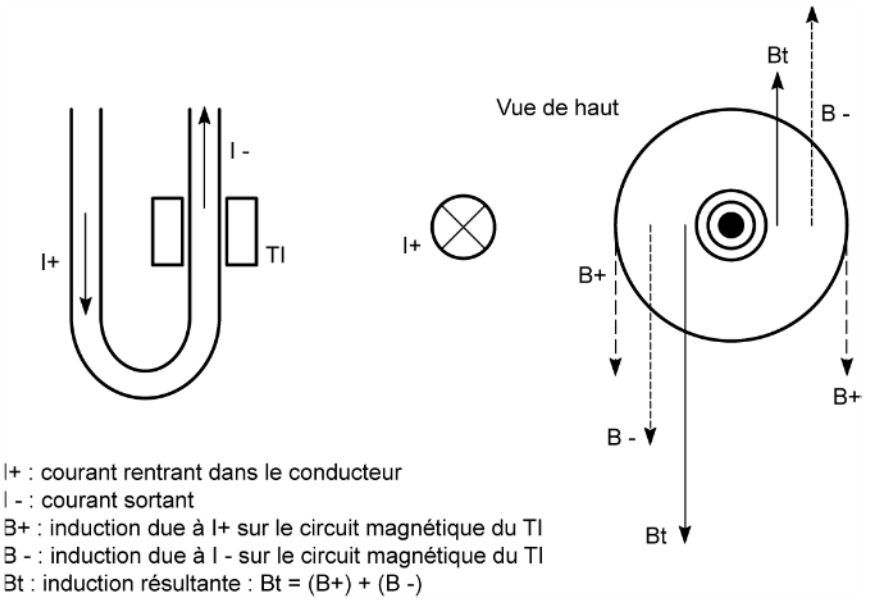


Figure 8.16 – Influence du conducteur primaire sur la mesure.

Grâce à la saturation naturelle du TC, le courant secondaire est limité, protégeant les équipements qui leur sont raccordés.

Constitution : l'isolation est réalisée en porcelaine ou en matériaux composites. Le circuit magnétique est en tôles roulées ou en revêtement carlite assurant ainsi une diminution des courants de Foucault.

Protection : la protection du secondaire d'un TC est une nécessité. En effet les transformateurs de courant étant souvent de rapport élevé, l'ouverture du secondaire alors que le primaire est encore sous tension peut donner lieu, comme nous avons déjà indiqué, à une surtension transitoire, due à l'ouverture d'un circuit secondaire selfique. La nécessité est la même dans le cas d'une tension très élevée permanente au secondaire, le transformateur de courant fonctionnant alors comme un transformateur de courant.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Par exemple pour un TC de rapport 1000:1 (rapport du nombre de spires secondaire sur le nombre de spires au primaire), en cas d'ouverture du secondaire, le courant I_1 provoque une tension de 1 V au primaire, ce qui donne 1000 V au secondaire. Ces tensions sont dangereuses pour le TC lui-même, pour les appareils de mesures reliés au TC et pour les personnels intervenants dessus.

Précautions à prendre : installer une PTI (protection électronique de TI ou TC) en permanence au secondaire du TC rendant toute coupure de charge au secondaire sans conséquence. Il existe deux calibres 1 A et 5 A et deux limites de tensions crêtes : 21 VAC et 25 VAC.

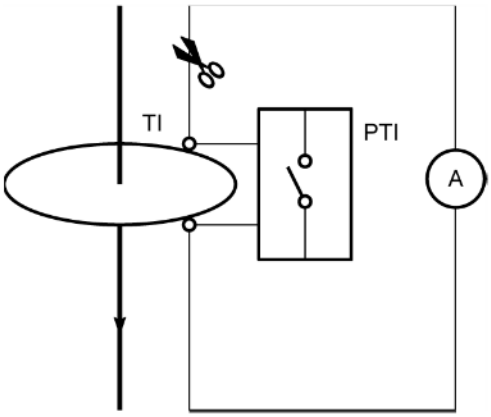


Figure 8.17 – Protection électronique du TI (Socomec).

■ Applications

- TGBT important, tableaux débrochables.
- Industries à risques d'explosion.
- Marine nationale ou marchande.
- Prévention des chaînes de mesure alimentées par des TC.
- Mines et carrières.

□ Remarque : mise en œuvre du TC bobiné

Attention, le TC bobiné a un sens de connexion : le sens de bobinage est repéré par un point et doit recueillir le conducteur adéquat pour respecter la formation des ampères-tours.

Normes :

- NFC 15-100 articles 473.1.4-556.3
- GAM EG 13.C (norme militaire)

Décrets :

- n° 88-1056 des travailleurs
- n° 91-986 des mines et carrières

Conforme à la publication UTE 18-610 :
« *Les interventions ou travaux sur les circuits alimentés par les secondaires de transformateurs de courants dont le primaire sont sous tension, doivent être précédés de la mise en court-circuit des secondaires de ces transformateurs de courant à l'aide de dispositifs appropriés* ».

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'organigramme de choix d'un TC est donné à la *figure 8.18*.

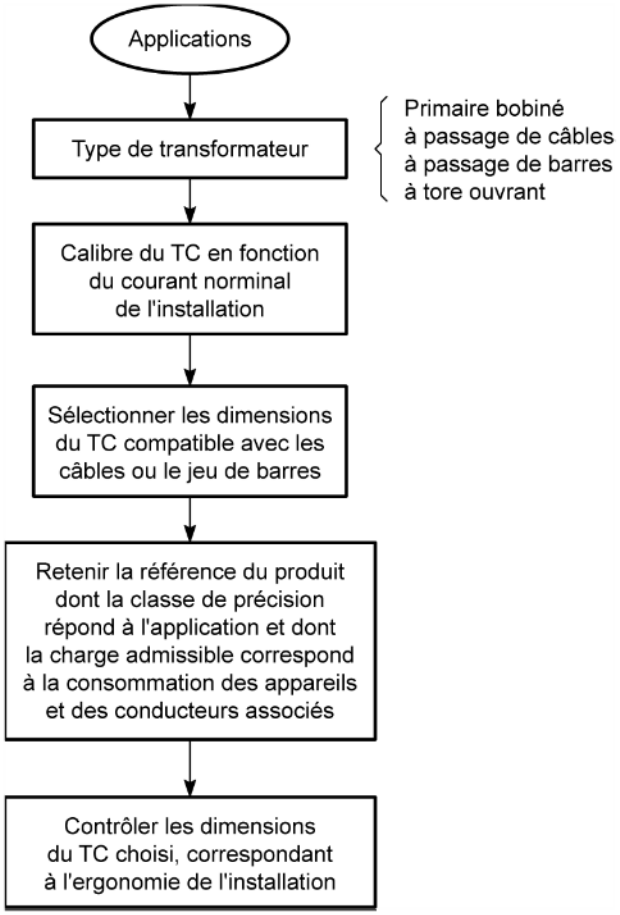


Figure 8.18 – Organigramme de choix d'un transformateur de courant.

8.3.4 Le capteur à bobine de Rogowski

Le support de la bobine est non ferromagnétique ; il est en résine, ce qui procure une très bonne linéarité, car il n'y a aucune saturation magnétique.
L'image du courant *Im* est une tension déphasée de +90°.

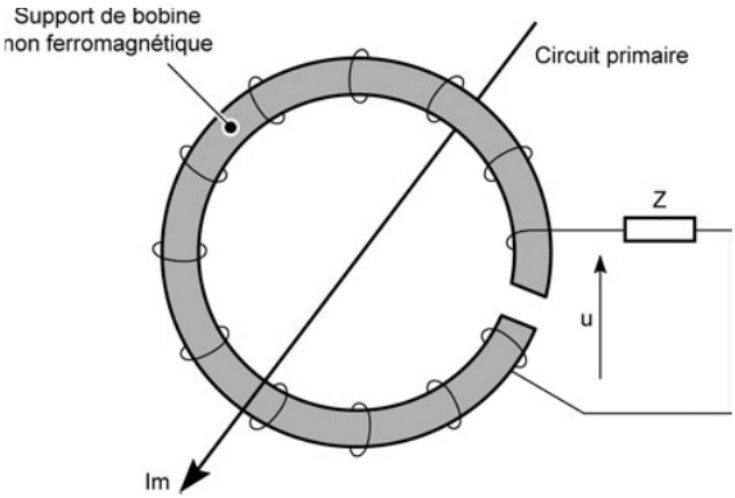


Figure 8.19 – Capteur à bobine de Rogowski.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Si on applique le théorème d'Ampère, on peut déterminer U en fonction du courant primaire à mesurer (*figure 8.20*) :

$$\oint cH.\mathrm{d}l = Np.Ip$$

$l = 2pRm$
Rm : rayon moyen du tore.
$Np = 1$
En déterminant $H = Ip/l$ puis $B = \mu_0.H$ enfin l'induction ϕ et la dérivée par rapport au temps multipliée par le coefficient $-Ns$, on arrive à l'expression de $U = f(Ip)$.

$$U(t) = -K.Ip.\omega.\sqrt{2}.\cos(\omega t + \phi)$$

d'où le déphasage de + 90°.

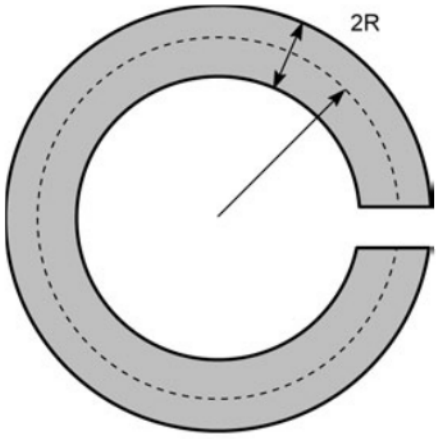


Figure 8.20 – Tore de Rogowski.

L'expression de $U(t)$ amène le schéma équivalent présenté à la *figure 8.21*.
Rb : résistance de la bobine.
L : inductance de la bobine.
Rap : résistance de l'appareil de mesure.

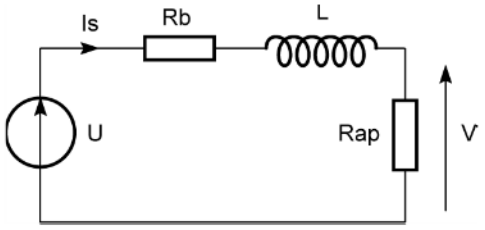


Figure 8.21 – Schéma équivalent.

À partir du schéma et de l'expression de $U(t)$, on peut définir Is en fonction de Ip :
Après calcul et simplification :

$$\underline{Is} = \frac{\underline{Ip}}{Ns}.\frac{1}{1 + \dfrac{Rb + Rap}{jl\omega}}$$

Ainsi pour les fortes fréquences ω tendant vers l'infini :

$$\underline{Is} \approx \frac{\underline{Ip}}{Ns}$$

En laboratoire, les bobines sont utilisées pour des fréquences de l'ordre du méga-hertz avec des courants de 100 kA, la sensibilité de ce type de capteur est très faible (voir $B = f(H)$ la pente de la caractéristique est $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, *figure 8.22*).
R_{appareil} doit être grande, en général de l'ordre de 10 kΩ.

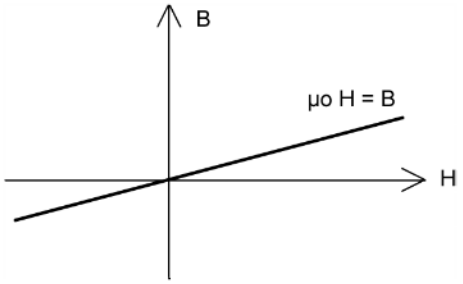


Figure 8.22 – Linéarité de $B = f(H)$.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Caractéristiques

□ Linéarité

Les capteurs à bobine de Rogowski sont linéaires, ont une bonne réponse en régime transitoire ce qui justifie leur emploi en sécurité et en protection.

Comparaison des caractéristiques $B = f(H)$ d'un TC et d'un capteur à bobine de Rogowski en transitoire :

TC : *Ip* peut prendre des valeurs considérables, *H* devient important (*H'*), il y a saturation magnétique $B = B_{sat}$ donc l'image fournie ne correspond plus à l'évolution de *Ip*.

Capteur à bobine de Rogowski : ne présente aucune saturation magnétique, donc $H = h'$ on a $B = B'$, l'image fournie est fidèle à l'évolution de *Ip* en transitoire (*figure 8.23*).

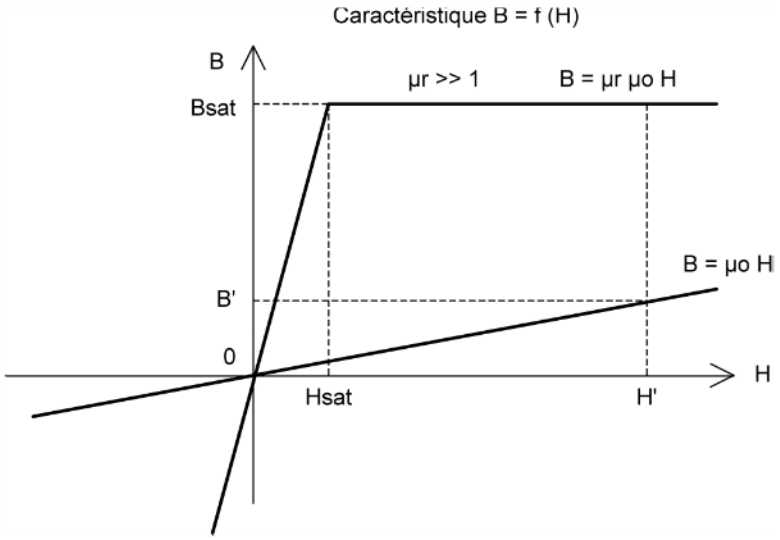


Figure 8.23 – Comparaison des caractéristiques $B = f(H)$ d'un TC et d'un capteur à bobine de Rogowski.

□ Influences externes

Toutefois la réponse de ces capteurs peut être affectée par l'environnement.

Afin d'éviter les variations de charge et donc une augmentation de l'erreur, il faut que la charge soit très résistive et peu sensible à la température.

La fréquence est fixée par le courant *Ip* impose le traitement électronique de l'image par un intégrateur de très bonne qualité.

L'influence électromagnétique d'autres conducteurs peut modifier la mesure.

Le capteur doit être constitué d'un blindage assurant une protection aussi parfaite que possible.

□ Gamme d'utilisation

Du fait de leur faible sensibilité, ces capteurs sont utilisés pour mesurer des courants importants en HTA et HTB.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

De plus, si la fréquence est importante, le terme $L\omega$ croît, et L peut compter peu de spires ce qui diminue les capacités parasites de la bobine, donc la bande passante s'en trouve élargie.

□ Spécification

L'ensemble capteur unité de traitement est fourni par les industriels. Cela simplifie le choix du capteur, le client ne spécifie plus que le courant secondaire, la puissance de précision, la classe de précision et le facteur limite de précision.

En revanche, il faut déterminer le niveau d'isolement, le courant de court-circuit et la plage d'utilisation.

Applications : systèmes AmpFlex de Chauvin Arnoux (*figure 8.24*) ou LEM-Flex de LEM .

Figure 8.24 – Système AmpFlex (Chauvin Arnoux).

8.3.5 Le capteur à effet Hall

Le capteur à effet Hall comporte un circuit magnétique traversé par un champ magnétique B qui est produit par le courant à mesurer Im ($Im = Ip$ au primaire).

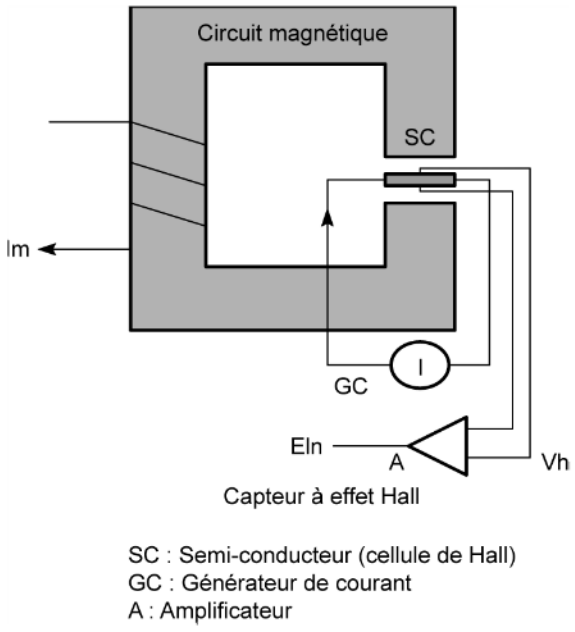


Figure 8.25 – Illustration du capteur à effet Hall.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Un semi-conducteur, appelé cellule de Hall, est disposé dans l'entrefer du circuit magnétique (*figure 8.25*).

Si un champ magnétique d'induction *B* est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant à mesurer, une tension *Vh* apparaît sur ses faces latérales (*figure 8.26*).

Cette tension est connue sous le nom de tension de Hall car découvert par Edwin Hall.

Quand le courant d'excitation du dispositif de Hall est maintenu constant, le champ magnétique *B* est directement proportionnel au courant circulant dans le conducteur. Donc la tension de sortie de Hall *Vh* est représentative de ce courant.

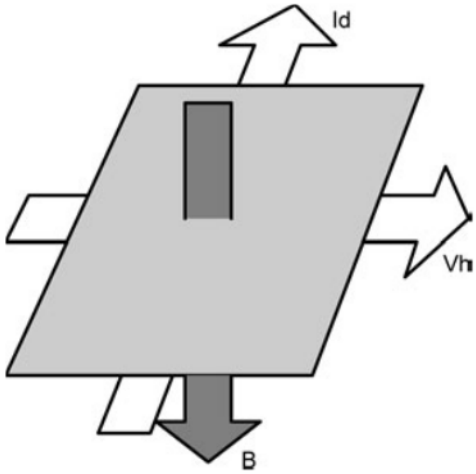


Figure 8.26 – Les différentes grandeurs électriques.

Un tel dispositif a deux avantages pour la mesure de courant :

- Il peut être utilisé pour mesurer des grandeurs en continu, puisque la tension *Vh* dépend uniquement de la force du champ magnétique.
- La réponse est instantanée, car la force du champ magnétique varie avec le courant à mesurer dans le conducteur. Ainsi, des signaux alternatifs de formes complexes peuvent être détectés et mesurés avec une grande précision et un faible déphasage (*figure 8.30*).

Recherche de *Vh* en fonction de *Ip* : *Ip* crée un flux dans le circuit magnétique. On considère que le semi-conducteur a une perméabilité relative $\mu r = 1$ et que le circuit magnétique est constitué de matériaux ferromagnétiques $\mu r >> 1$ (*figure 8.27*).

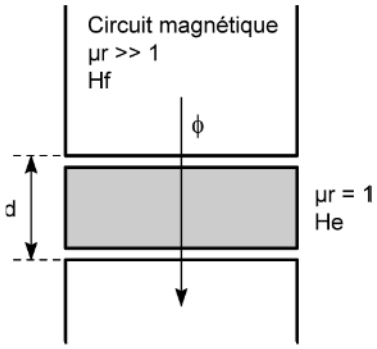


Figure 8.27 – Vue en coupe d'une sonde à effet Hall.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Après application du théorème d'Ampère :

$$\oint cH.\mathrm{d}l = Np.Ip \qquad He.f + Hf.lf = Np.Ip$$

On obtient :

$$Vh = k.Ip.\frac{\mu_0.Np}{d}$$

Hf : excitation magnétique dans le fer.
He : excitation magnétique dans l'entrefer.
d : épaisseur de la cellule de Hall.
Les constructeurs ajoutent à la cellule de Hall, un circuit magnétique ayant pour fonction de concentrer le champ en surface du semi-conducteur. *B* dévie les électrons sur la totalité de la face soumise au champ, la sensibilité est meilleure.
Le semi-conducteur possède une perméabilité relative proche de 1 ce qui l'assimile à un entrefer dans le circuit magnétique, la plage de mesure est élargie (*figure 8.29*).

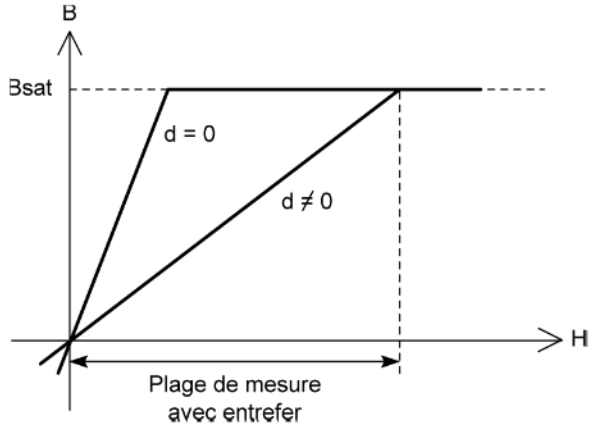


Figure 8.28 – Sensibilité accrue d'une sonde à effet Hall.

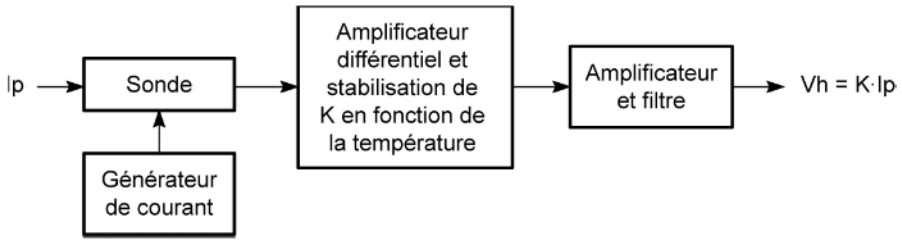


Figure 8.29 – Schéma fonctionnel d'une sonde à effet Hall.

■ Caractéristiques

□ Précision

Vh n'est pas parfaitement proportionnelle à *B*, quatre facteurs en sont la cause :

– La tension d'offset : elle est due au semi-conducteur, même si *B* est nul, *Vh* ne l'est pas, c'est ce que le constructeur appelle la composante résiduelle inductive.
– Les courants de Foucault : les variations alternatives de *B* donnent naissance à des courants de Foucault dans la cellule de Hall, cela réduit la valeur du courant

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

de commande (augmentation de la température) Pour des entrefers assez larges, on néglige les courants de Foucault sous 10 MHz.

– L'erreur de linéarité : il y a des phénomènes de saturation magnétique malgré l'entrefer, cela ajoute des erreurs de linéarité.
– La température : elle modifie les caractéristiques de la cellule de Hall : K varie de 0,01 % par °C.

□ **Sensibilité**

Pour les courants faibles, le problème est récurant. Les cellules actuelles ont une sensibilité de l'ordre de 40 mV/A, d'où un domaine d'emploi s'étendant de 1 A à 100 kA.

□ **Bande passante**

Il est possible de mesurer des courants continus et alternatifs dont la bande passante serait de l'ordre de 40 kHz (ce qui est suffisant pour le contrôle des régulations à MLI).

L'électronique de traitement limite la bande passante, sensibilité et fréquence influencent la technologie des composants.

Exemples d'applications de la série PR de LEM : *figure 8.30*.

Figure 8.30 – Pinces à effet Hall (Fluke).

8.3.6 Le TC à flux nul

C'est un transformateur de courant auquel on ajoute un enroulement auxiliaire de façon à éliminer les phénomènes de saturation magnétique. On cherche à travailler sur la courbe de 1re aimantation ($B = 0$; $H = 0$) (*figure 8.31*).

En cas de court-circuit ou surcharge, l'électronique a un temps de réponse trop long par rapport à la perturbation ce qui sature le circuit magnétique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

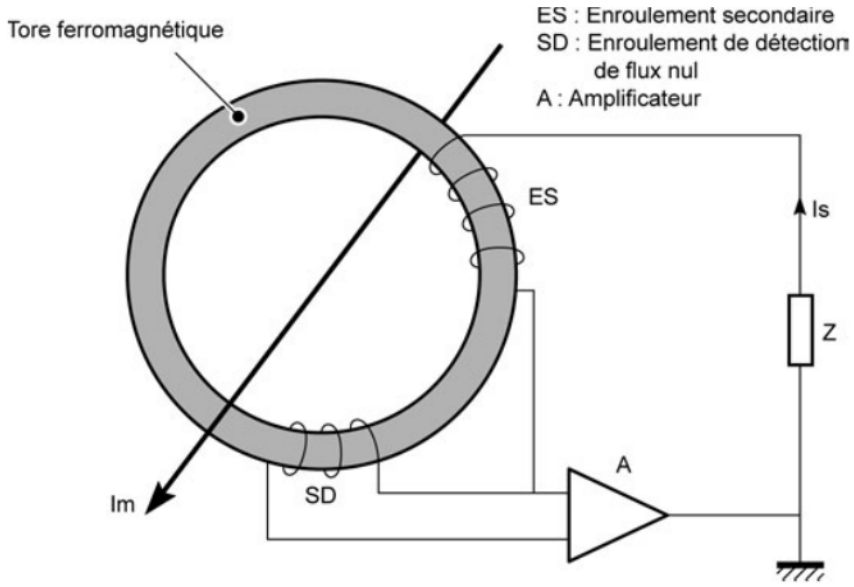
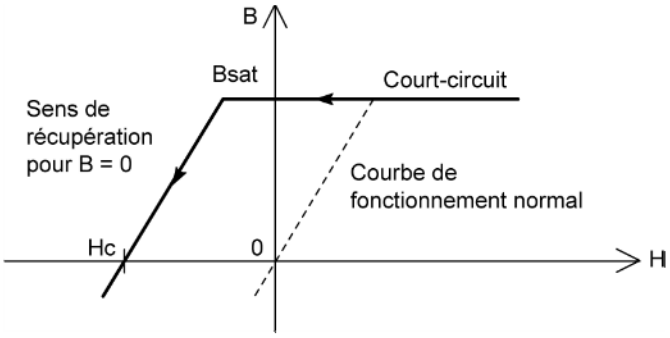


Figure 8.31 – TC à flux nul.

Après un court-circuit, l'unité de traitement annule le champ pour obtenir $B = 0$ or du fait de la saturation, H n'est pas nul (H coercitif), il apparaît alors une tension d'offset donc une erreur de mesure (*figure 8.32*). Il faut procéder à une démagnétisation du capteur de façon à avoir $B = 0$ à $H = 0$.

Figure 8.32 – Démagnétisation d'un capteur.



■ Caractéristiques

□ Précision

Dans le cadre d'un fonctionnement normal, la précision de ce capteur est très bonne, l'erreur est de l'ordre de 0,02 %, pour la phase on rencontre des erreurs inférieures à 0,1 min d'angle.

□ Utilisation

La page d'utilisation est liée à l'électronique qui gère la compensation de flux. Ces capteurs sont coûteux et sont presque uniquement réservés à l'étalonnage des autres TC, compte tenu de leur précision.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

□ **Coût**

Son coût est élevé.

8.3.7 Le capteur à effet Hall à flux nul

On ajoute un enroulement auxiliaire à un capteur à effet Hall pour enrayer toute saturation.

Le principe de l'annulation du flux est identique au TC à flux nul, ainsi que les problèmes liés à la rapidité de l'électronique en cas de surintensité.

En revanche la bande passante est beaucoup plus grande, de l'ordre de quelques mégahertz.

Ses propriétés sont similaires à celles du capteur à effet Hall.

8.3.8 Le capteur optique à effet Faraday

L'effet Faraday repose sur l'utilisation d'une onde lumineuse polarisée soumise à un fort champ électrique et qui voit son plan de propagation effectué une rotation d'un angle α (*figure 8.33*).

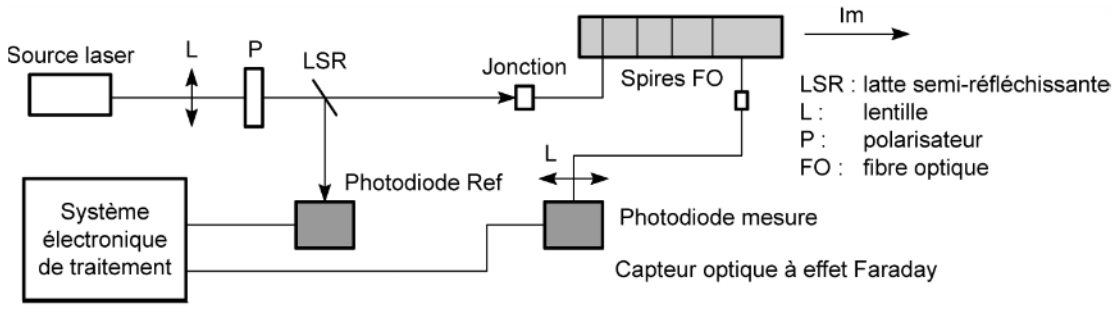


Figure 8.33 – Illustration du capteur optique à effet Faraday.

■ **Rappels d'optique**

Polarisation : on parle de polarisation quand une onde lumineuse monochromatique décrit une sinusoïde en rotation autour de son axe de propagation. La vitesse de rotation est constante.

Le plan de propagation de l'onde est le plan XZ et la rotation s'effectue autour de l'axe X (*figure 8.34*). X indique aussi le sens de propagation de l'onde. Ω est la vitesse de rotation.

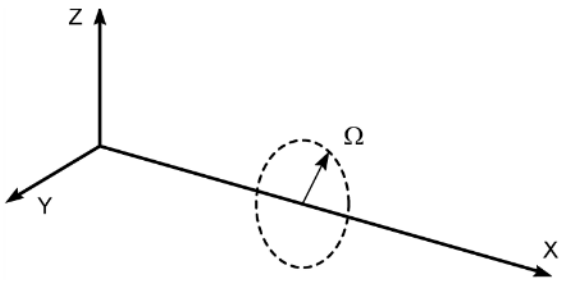


Figure 8.34 – Polarisation

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Biréfringence : certains corps naturels présentent ce phénomène : une lumière qui traverse ce corps ne se propage pas à la même vitesse suivant son plan de polarisation (*figure 8.35*).

L'angle α est donné par la relation :

$$\alpha = V\oint H.\mathrm{d}l$$

V : constante de Verdet dépendant.

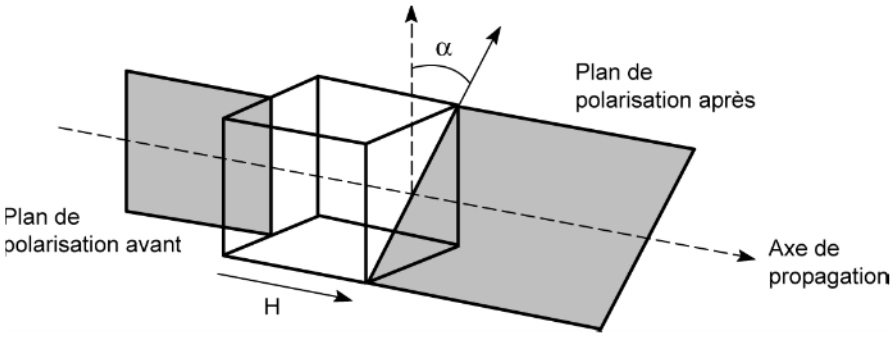


Figure 8.35 – Biréfringence.

Il existe deux réalisations possibles dans le cadre du capteur optique à effet Faraday :

– *Cristaux optiques* : ils sont plus ou moins sensibles aux courants extérieurs, de plus leur montage est complexe, ils doivent être au plus près du conducteur.
– *Fibre optique* : elle est peu sensible aux courants externes mais plus à la température (modification des propriétés optiques). $\alpha = V\oint H.\mathrm{d}l = V.N.I$ avec N le nombre de spires de fibre optique.

Caractéristiques :

Précision : les capteurs optiques sont relativement sensibles à la température, donc leur précision s'en trouve affectée et l'électronique doit compenser ces effets.

Les contraintes mécaniques sur la fibre optique et la température modifient les taux de biréfringence et celui-ci doit rester constant.

L'électronique agit aussi sur la bande passante et sur l'aptitude à détecter α.

Malgré cela, les capteurs optiques ont une précision proche de celles des TC.

Après avoir justifié les phénomènes physiques des capteurs de courant les plus usités, nous allons faire le point sur les différents matériels utilisant ces principes en dégageant leurs avantages et leurs inconvénients.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

8.4 Matériels de mesure

Le *tableau 8.3* dresse la liste des avantages et des inconvénients de chacun des types de matériels ; le *tableau 8.4* en résume le principe d'utilisation.

L'appareil le plus utilisé est évidemment la pince ampèremétrique.

Tableau 8.3 – Avantages et inconvénients des différents matériels de mesure de courant.

Principe physique	Matériels proposés	Avantages	Inconvénients
Shunt	Ampèremètre	Montages fixes, essais en laboratoire, enseignement, lecture directe	Ce montage ne convient pas à la maintenance, puisque pour insérer l'appareil, il faut interrompre l'alimentation de la charge (arrêt de la chaîne de fabrication)
TC	Shunt	Montage fixe, essais en laboratoire, enseignement, entrée intensité d'un appareillage de mesure. Permet de charger un TC ou une pince ampèremétrique	Il n'y a pas d'isolement galvanique entre la source et l'appareil de mesure. Ce montage convient seulement pour une installation fixe, puisque pour insérer le shunt, il faut interrompre l'alimentation de la charge (arrêt de la chaîne de fabrication)
	TC	La distance entre la source et la mesure est limitée. La rupture du secondaire du TC représente un danger. Ce montage convient seulement pour une installation fixe en alternatif	Montage en installation fixe (armoire). Conversion d'intensité et isolement galvanique
Bobine de Rogowski	Capteur flexible d'intensité	Mesure des courants forts, possibilité d'enserrer n'importe quel conducteur (barre, câble, toron…). Faible déphasage (idéal pour les mesures wattmétriques), absence d'effet de saturation et très léger (pas de circuit magnétique). Conversion d'intensité et isolement galvanique	Réservé à la mesure des courants en AC industriels (1 à 10 kA)

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 8.3 – Avantages et inconvénients des différents matériels de mesure de courant. *(Suite)*

Effet Hall	Transformateur à effet Hall	Montage en installation fixe, mesure du courant dans toutes ces composantes (AC, DC, AC+DC). Génération de courant de process sans interruption de charge. Conversion d'intensité, isolement galvanique	Traitement des petits courants difficile. Prix élevé (ajout de l'unité de traitement)
	Convertisseur de mesure	Montage en installation fixe, mesure du courant dans toutes ces composantes (AC, DC, AC+DC). Génération de courant de process (avec décalage d'origine possible). Conversion d'intensité, isolement galvanique	Prix élevé (ajout de l'unité de traitement)
	Pince ampèremétrique	Idéale pour la maintenance, l'enseignement, le laboratoire. Tout type de mesure possible. Génération de signaux de sortie de divers types possible. Isolement galvanique et sécurité largement accrue	Prix élevé (si ajout de l'unité de traitement, des fonctions et des protections). Ne convient pas en installation fixe

Tableau 8.4 – Principe d'utilisation des différents matériels de mesure de courant.

Matériels proposés	Principe d'utilisation
Ampèremètre	On insère un ampèremètre dans le montage. L'intensité passe au travers d'un shunt interne à l'appareil ou d'un bobinage suffisamment dimensionné. La valeur est directement lue sur le dispositif d'affichage en ampères. Cet appareil peut être portatif ou de tableau sous forme d'un afficheur numérique ou galvanométrique
Shunt	On insère un shunt dans le montage. L'intensité traversant le shunt calibré crée une chute de tension proportionnelle à ses bornes. La valeur peut être lue à l'aide d'un voltmètre. Les shunts sont calibrés en ampères et la mesure en volts (par exemple 100 A/0,1 V soit 1 mV/A)

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 8.4 – Principe d'utilisation des différents matériels de mesure de courant. *(Suite)*

TC	L'intensité à mesurer traversant le conducteur crée un champ magnétique proportionnel à l'intensité débitée par la charge dont l'image peut être ensuite récupérée par un transformateur calibré. La valeur est lue en ampères. Les TC et la mesure sont calibrés en ampères (par exemple 100/5 A ou 100/1 A)
Capteur flexible d'intensité	Le conducteur dont on cherche à mesurer l'intensité du courant forme le primaire, tandis que le secondaire est formé par un bobinage spécial réalisé sur un support flexible. Cette bobine développe à ses bornes une tension *U* proportionnelle à la dérivée de courant. Cet ensemble doit être ensuite traité par une électronique appropriée
Transformateur à effet Hall	Une cellule à effet Hall placée dans un champ magnétique produit une tension proportionnelle à l'intensité débitée par la charge à ses bornes. La valeur peut être lue à l'aide d'un voltmètre. Il est alors nécessaire de traiter le signal de mesure
Convertisseur de mesure	Un transformateur interne qui peut être muni d'une cellule à effet Hall placée dans son circuit magnétique, voit apparaître une tension proportionnelle à l'intensité débitée par la charge. La valeur peut être lue par un ampèremètre ou un voltmètre
Pince ampèremétrique	Elle peut consister en un simple transformateur (ouvrant) chargé ou non au secondaire avec une cellule à effet Hall avec ou sans traitement du signal de mesure avec ou sans affichage. Elle peut comporter l'ensemble des fonctions d'un appareil de mesure (A, V, Ω, F, W, VA, var, FP, THD…). Elle peut avoir divers types de sorties (analogiques, RS232…)

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

8.5 Pince ampèremétrique

On distingue trois types de pinces ampèremétriques.

8.5.1 Dans le cas du régime alternatif uniquement

Elles sont basées sur le principe d'un TC d'un type particulier.

Un transformateur est constitué, comme chacun sait, d'un circuit magnétique sur lequel sont bobinés deux enroulements primaires et secondaires (*figure 8.36*). Lorsqu'un courant I_1 passe dans le bobinage primaire, il crée par le circuit magnétique, un courant dans le bobinage secondaire régi par la relation : $I_2 = \dfrac{I_1 \cdot N_1}{N_2}$.

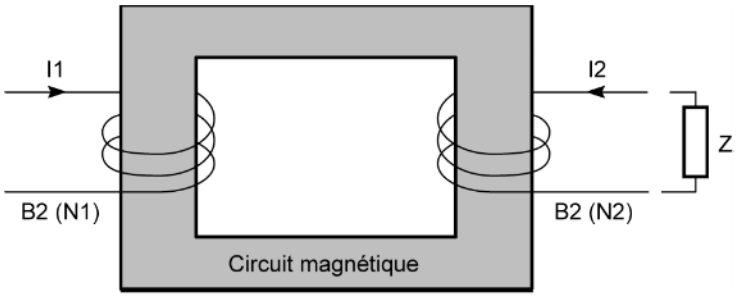


Figure 8.36 – Principe du TC utilisé en alternatif.

Le principe reste identique mais la constitution est différente : les mâchoires de la pince contiennent le circuit magnétique commun et l'enroulement secondaire (*figure 8.37*). Le conducteur seul constitue l'enroulement primaire ($N_1 = 1$) ce qui donne $I_2 = \dfrac{I_1}{N_2}$ (N_2 est le nombre de spires au secondaire de la pince).

Or il est souvent difficile de mesurer I_1 directement car les courants sont trop importants pour être mesurés directement par l'appareil ou simplement parce que l'on ne peut pas interrompre le circuit.

Pour obtenir un niveau convenable, un nombre connu de tours est effectué sur le bobinage de la pince.

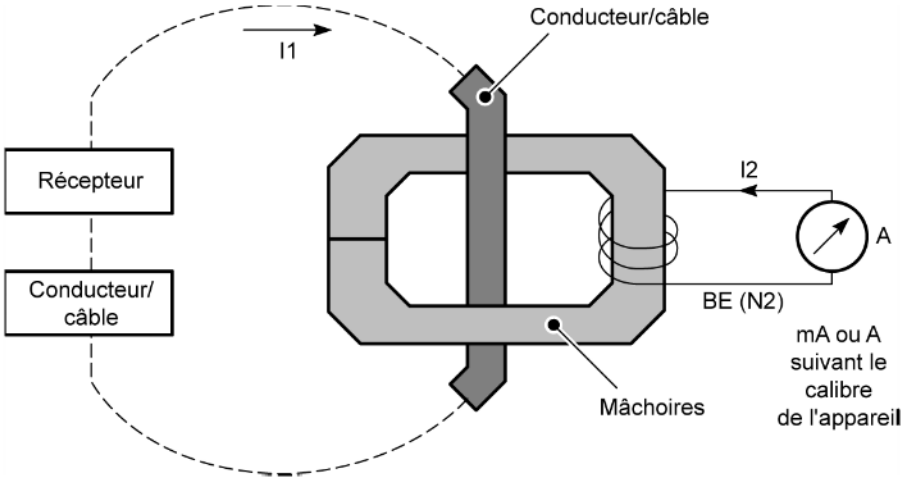


Figure 8.37 – Pince utilisée en alternatif.

Le nombre de tours du bobinage secondaire est généralement un nombre entier (100, 500, 1 000).

Si N_{32} est de 1 000 spires, la pince aura un rapport de 1 000 : 1 soit 1 mA au secondaire pour 1 A au primaire.

Il existe d'autres rapports pour des applications bien spécifiques : 500 : 2, 2 000 : 2, 3 000 : 1, 3 000 : 5.

Ces pinces peuvent être utilisées avec des multimètres numériques sur le calibre courant alternatif (il faudra multiplier la valeur lue par le rapport de la pince) avec tout appareil à entrée courant ayant une bonne impédance d'entrée.

Avec tout appareil ne disposant que des calibres tensions : oscilloscope, centrale d'acquisition, elles peuvent avoir des sorties tensions alternatives ou continues. Dans

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

ce cas, la sortie en millivolts de la pince est proportionnelle au courant mesuré (1 mV [AC]/A [AC]).

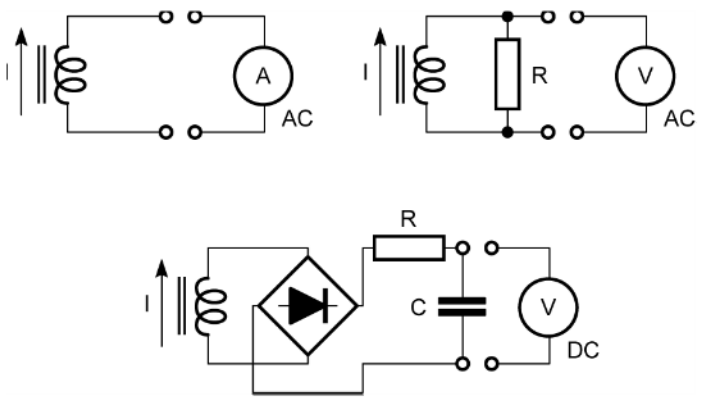


Figure 8.38 – Trois types de pinces adaptables aux multimètres (ampèremètre, voltmètre AC ou DC).

Technologie particulière : système AmpFlex de Chauvin Arnoux. Les AmpFlex série A100, ce sont neuf modèles standards de tores flexibles pour mesurer les courants alternatifs de 0,5 A à 10 kA, aux fréquences industrielles. Chaque tore flexible (longueur 45, 80 ou 120 cm selon le modèle) est raccordé par un cordon blindé à un petit boîtier contenant l'électronique de traitement et une pile 9 V standard. L'entraxe des douilles (19 mm) permet le raccordement direct sur tout type de multimètre, sur un enregistreur doté d'une entrée tension alternative (impédance Z > 1 MΩ) ou encore sur un oscilloscope, avec un accessoire de raccordement spécifique. Le boîtier dispose d'un témoin de contrôle de pile.

Rappel du principe de fonctionnement

Le capteur AmpFlex est un transformateur conçu sur le principe de la bobine de Rogowski.
Le conducteur véhiculant le courant alternatif à mesurer forme le circuit primaire, tandis que le secondaire est formé par un bobinage spécifique, réalisé sur un support flexible. Cette bobine développe à ses bornes une tension proportionnelle à la dérivée du courant primaire à mesurer. Cette tension alternative est alors ramenée par un câble blindé au boîtier contenant toute l'électronique de traitement et la pile. La série A100 offre différents rapports d'entrée/sortie selon les modèles 0,1 mV, 1 mV, 10 mV, 100 mV par ampère.

Les atouts des AmpFlex

– La **flexibilité** et la **maniabilité** : c'est leur intérêt majeur. Ils peuvent enserrer un conducteur quelle que soit sa nature (câble, barre, torro…) et son accessibilité. Le système d'ouverture/fermeture du tore, simple et rapide, autorise la manipulation aisée dans toutes les situations, même avec des gants de sécurité, obligatoires dès lors que l'on doit intervenir sur des conducteurs nus sous tension. Et les plus petits modèles (45 cm), pour compenser leur plus grande rigidité, sont préformés afin de faciliter l'enserrage autour du primaire. À noter également la

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

possibilité d'enserrer plusieurs câbles ou des jeux de barres, en raison de la grande longueur du capteur (jusqu'à 1,2 m en standard), ce qui permet une sommation de mesure.

– Une **plage de mesure très étendue** : chaque modèle, quel que soit son calibre, commence à mesurer à partir de courant primaire de 500 mA. Les différents calibres proposés (suivant les modèles, en mono ou bicalibre) sont 20 A, 200 A, 300 A, 1 kA, 2 kA, 3 kA et 10 kA.
– Une **conception des plus sûres** : question sécurité, ils sont conformes à la norme IEC 61010 (1 000 V, catégorie III) et double isolation. Question robustesse, le capteur tolère une température permanente de 80 °C et bénéficie d'un indice de protection IP65. Il résiste aux huiles et hydrocarbures aliphatiques.
– La **bande passante** de 10 Hz à 20 kHz, adaptée aux fréquences industrielles et aux analyses d'harmoniques.
– La **bonne précision** de 1 % typique.
– La **légèreté** : en l'absence de circuit magnétique
– L'**absence d'effet de saturation** donc d'échauffement.
– Le **faible déphasage** : constant sur toute l'étendue de mesure, donc approprié aux mesures wattmétriques.

8.5.2 Dans le cas des régimes alternatif et continu

Basé sur l'effet Hall déjà vu précédemment. Les pinces sont constituées d'une mâchoire insérant une ou deux cellules de Hall. Elles sont capables de mesurer aussi du continu, elles sortent en mV AC et DC et sont donc connectables à n'importe quel appareil à entrée tension.

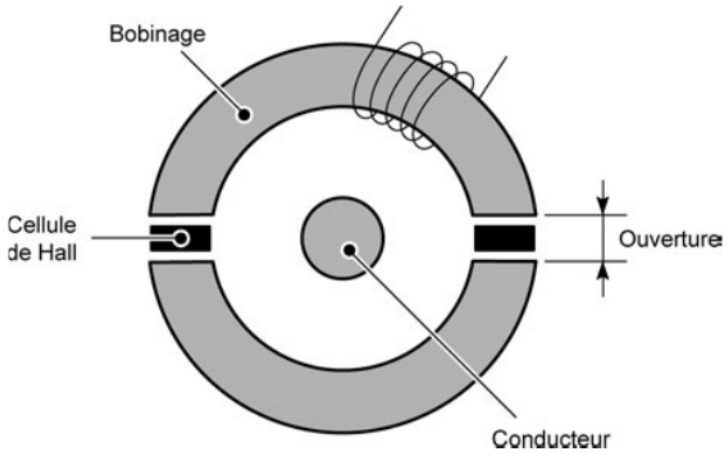


Figure 8.39 – Illustration d'une pince ampèremétrique polyvalente (courant continu comme alternatif).

8.5.3 Pour les courants faibles, boucle de process et courants de fuite

Les pinces utilisent le principe de saturation des circuits magnétiques, elles sont prévues pour la mesure de courants faibles continus comme des boucles process 4-20 mA (*figures 8.40, 8.41 et 8.42*).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Si les courants sont trop faibles pour la sensibilité de la pince, il est possible d'insérer plusieurs fois le câble dans la mâchoire de la pince. La valeur du courant est le rapport de la valeur lue sur le nombre de tours.
Exemple : rapport de pince : 1000:1, multimètre réglé sur le calibre 200 mA AC, nombre de tours : 10, lecture du multimètre : 60 mA AC, le courant réel tenant compte des 10 spires crée : 60 mA × 1000/10 = 6 A.

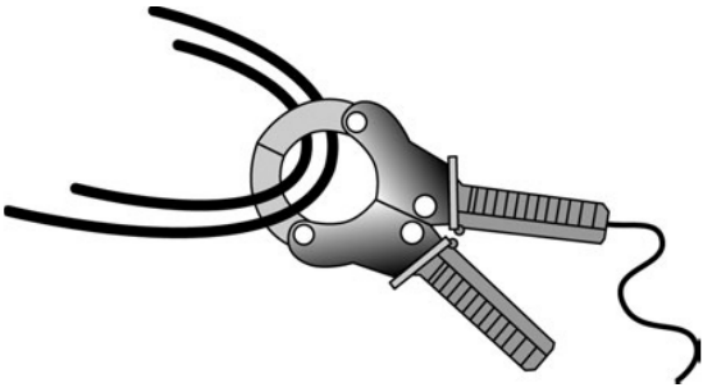


Figure 8.40 – Pince courants faibles.

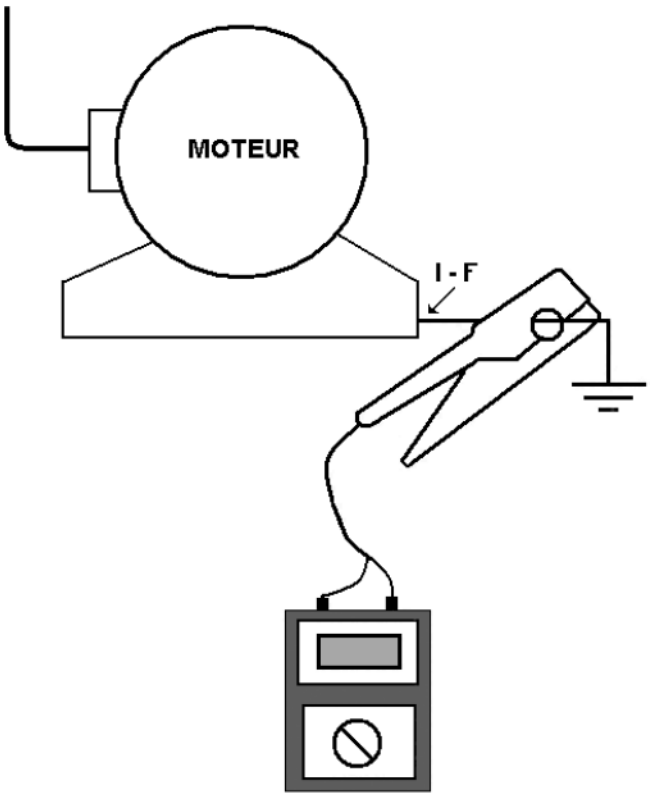


Figure 8.41 – Recherche de défaut de fuite avec une pince courants faibles ou un modèle adaptable sur multimètre.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

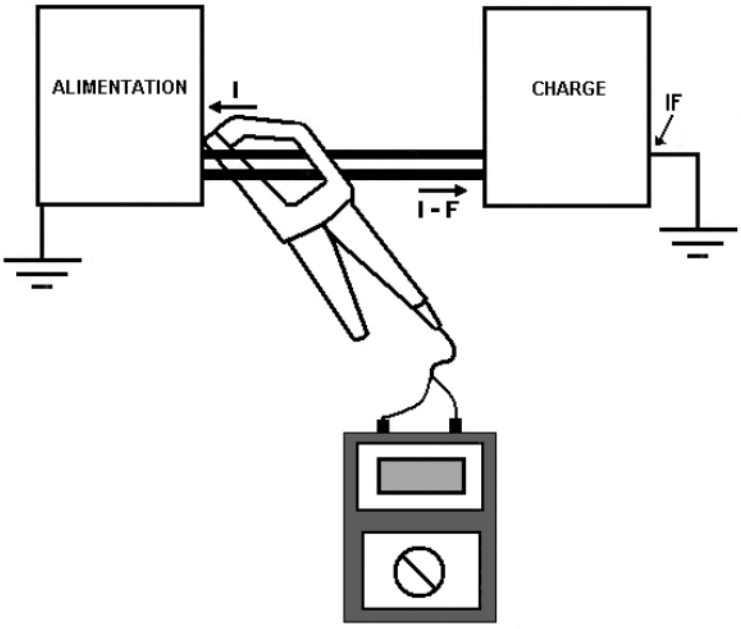


Figure 8.42 – La recherche de défaut de fuite peut se faire en enserrant les deux câbles de deux polarités différentes, si la lecture est non nulle il y a bien présence d'un courant de fuite.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

8.6 Applications des différentes pinces ampèremétriques

8.6.1 À effet Hall AC/DC (TRMS)

- Diagnostic automobile : mesure du courant de démarrage du moteur à courant continu sur véhicule électrique des collectivités ou mesure du courant de fuite sur une batterie sur véhicule thermique.
- Moteur piloté par variateur : mesure de l'intensité nominale moteur déformée en TRMS (valeur efficace vraie : voir rappels) grâce à une bande passante élevée.
- Contrôle de l'équilibrage des phases en sortie d'onduleur, mesures de courants déformés sur charge non linéaire.
- Diagnostics sur les alimentations à découpage en amont et en aval par la mesure de courants déformés et à fréquence élevée.

8.6.2 Enregistreur numérique en AC RMS

- Contrôle débit et charge d'alternateur, générateur, groupe électrogène.
- Gestion d'énergie et diagnostic de panne.

8.6.3 Pinces AC/DC faibles courants (1 mA à 4,5 A)

- Contrôle de boucle de process : 4-20 mA ou vérification de certains capteurs ou des courants de commande de relais.
- Mesure de courants de défauts (de fuite).
- Contrôle de l'isolement par un moyen détourné des matériels électroniques, en effet les circuits électroniques n'apprécient pas beaucoup les tensions nécessaires à la mesure des isolements des mégohmmètres traditionnels.

– Certaines pinces peuvent évaluer l'isolement en mesurant le courant de fuite circulant à la terre dans le conducteur de protection vert-jaune.

8.6.4 Pinces à capteur flexible en AC

Quand les pinces ampèremétriques traditionnelles ne permettent plus d'enserrer les conducteurs de courant électrique, les nouveaux capteurs de courant alternatif AmpFlex répondent « Présents » ! Des outils de mesure souples, sûrs, et remarquablement simples d'emploi.
Pinces adaptées aux mesures de courant sur câbles phase/neutre ou phase/neutre/terre.

8.7 Guide de choix

Il s'agit de répondre aux questions suivantes (voir « Méthodologie », paragraphe ci-après) :
– Quelle est la nature du courant à mesurer : alternatif ou continu (les pinces en courant continu sont répertoriées en AC/DC car elles mesurent les deux) ?
– Quelle est la valeur la plus élevée et la valeur la moins élevée de l'intensité du courant à mesurer ?
– La précision à bas niveau est-elle appropriée ? Sinon sélectionner une pince pour courant plus faible. La précision est la plus élevée sur les calibres forts.
– Quelle est la taille du conducteur à enserrer (la taille de la mâchoire) ?
– Quel type de signal accepte l'appareil sur lequel sera branchée la pince (mA, mV, AC, DC) ? vérifier l'impédance de charge maximale pour s'assurer que la pince répondre bien aux besoins.
– Quelle est la tension du conducteur, certaines pinces sont prévues jusqu'à 600 V ?
– Quel type de connectique utilisé : douilles, cordons + fiches bananes ou fiches BNC ?
– Est-ce que la pince devra mesurer des harmoniques ou des puissances ?
– Quelles sont les spécifications en fréquence et la valeur des déphasages…

■ Méthodologie

1. Pour réaliser son choix
Pour adapter le mieux un capteur à un montage à mesurer il convient de tenir compte des points suivants :
– l'étendue de mesure en ampères ;
– la bande passante en hertz avec ou sans continu ;
– la précision en % de l'étendue de l'échelle ;
– la résolution (c'est la plus petite valeur lue) ;
– la catégorie de surtension ou d'installation I, II ou III (qui précise un environnement) ;
– le degré de pollution (1, 2 ou 3 selon l'ambiante) ;
– la classe 1 (avec terre), 2 (double isolation) ou 3 (tension non dangereuse) si accessible à l'utilisateur.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Méthodologie

Pour réaliser son choix

Pour adapter au mieux un capteur au montage à mesurer, il convient de tenir compte des points suivants :

- l'étendue de mesure en ampère
- la bande passante en hertz avec ou sans continu
- la précision en pourcentage de l'étendue de l'échelle
- la résolution (c'est la plus petite valeur lue)
- la catégorie de surtension ou d'installation (qui précise un environnement) : I, II, III
- le degré de pollution (selon la pollution ambiante) : 1, 2 ou 3
- la classe : 1 (avec terre). 2 (double isolation) ou 3 (tension non dangereuse) si accessible à l'utilisateur

Pour réaliser une mesure

- connecter la pince à l'appareil.
- sélectionner la fonction et le calibre adapté.
- enserrer la pince autour d'un seul conducteur.
- lire la valeur du courant traversant le conducteur en tenant compte du calibre de la pince et du calibre de l'appareil de mesure. Par exemple, pour une pince à sortie 100 mV/A, on a choisi sur l'oscilloscope 0,5 V/div : le calibre réel en courant est donc 5 A/div. Mais il existe des pinces ampèremétriques adaptables sur des multimètres permettant de donner directement la valeur en courant en milliampères ou en ampères en AC ou DC.

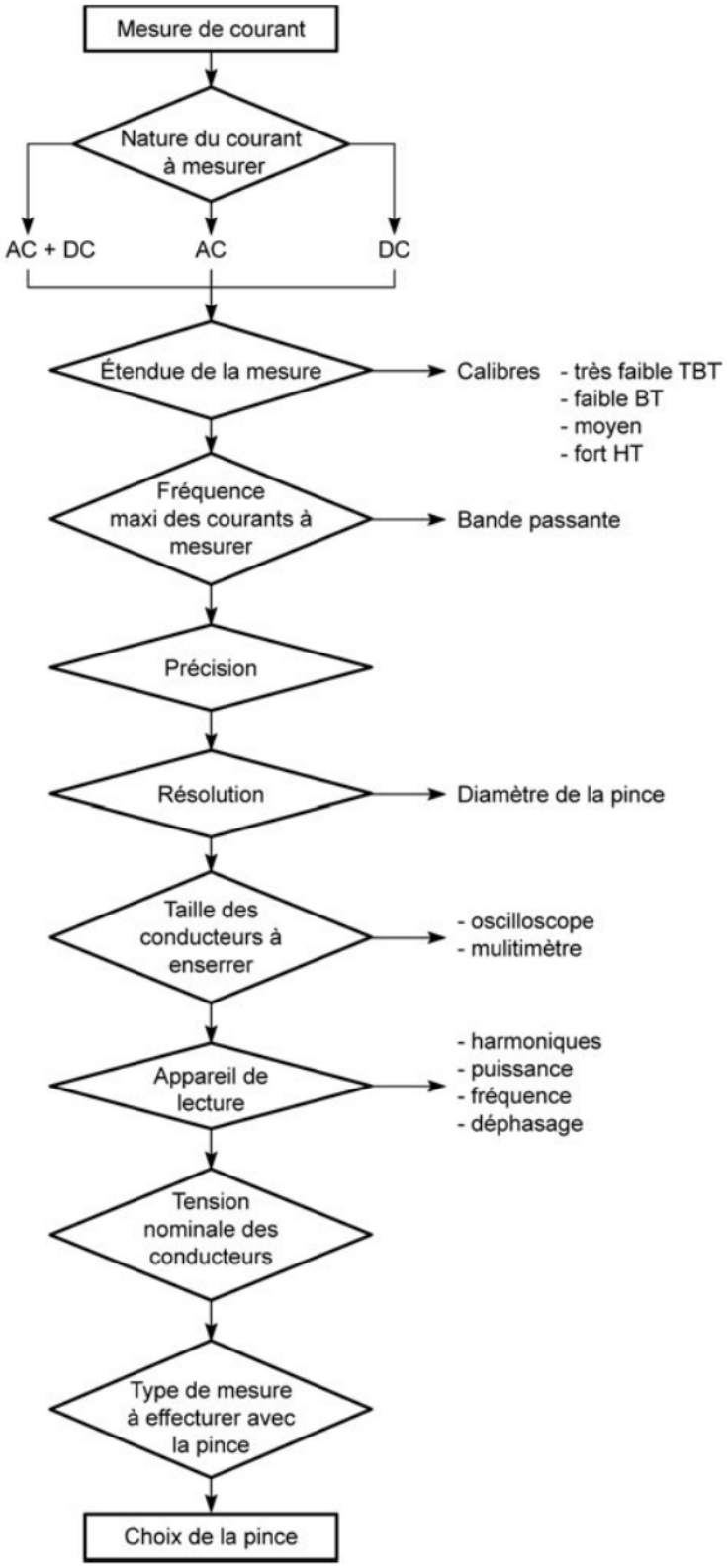


Figure 8.43 – Organigramme de choix d'une pince de courant.

2. Pour réaliser une mesure

– Connecter la pince à l'appareil.
– Sélectionner la fonction et le calibre adapté.
– Enserrer la pince autour d'un seul conducteur.
– Lire la valeur du courant traversant le conducteur en tenant compte du calibre de la pince et du calibre de l'appareil de mesure.

Exemple : pince à sortie 100 mV/A on a choisi sur l'oscilloscope 0,5 V/div, le calibre réel en courant est donc 5 A/div.
Mais il existe des pinces ampèremétriques adaptables sur des multimètres permettant de donner directement la valeur en courant en mA ou A en AC ou DC.
Les pinces ampèremétriques sont de cinq grandes catégories : mesure de courant de fuite, mesure sur oscilloscope, mesure de courant de process, mesure au secondaire de transformateur d'intensité, et mesure de courant alternatif sinusoïdal déformé.
Ensuite il faut distinguer les mesures en mode AC, AC/DC et par flexible de courant puis les différentier suivant leur type de sortie analogique ou numérique.
La *figure 8.44* présente 5 pinces Chauvin Arnoux illustrant les catégories citées ci-dessus.

8.8 Appareillages

Vous trouverez sur le site web de Chauvin Arnoux, les documentations techniques des appareils dédiés aux mesures de courant comme les appareils polyvalents intégrant cette mesure.

8.9 Les pinces au regard de la norme

La norme internationale CEI 61010 définit les prescriptions générales de sécurité pour les appareils électriques destinés aux usages professionnels, industriels et éducatifs.
Les pinces F11 et F15 sont double isolation, degré de pollution 2 (protection contre les corps étrangers, solides, liquides…) et de catégorie II (protection contre les surtensions, transitoires…) et possèdent également une protection contre les chocs mécaniques (chute de 1 m de hauteur sur réceptacle en chêne posé sur béton).
Les pinces AmpFlex respectent la norme CEI 61010-1-32 pour les tensions de 1 000 V par rapport à la terre, une catégorie d'installation CAT III (ou 600 V CAT IV selon CEI 664) et un degré de pollution 2.
Les pinces PAC 10/20 sont conformes à la norme CEI 61010-1 et 61010-2-032 600V CAT III degré de pollution 2.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Figure 8.44 – Pince D pour la mesure sur oscilloscope, pince C 148 pour la mesure des courants de fuite, pince MN 10 pour la mesure au secondaire de transformateur d'intensité, pince K1 pour la mesure de courant de process, et pince F3N pour la mesure TRMS du courant alternatif sinusoïdal déformé.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

9 • MESURE DE PUISSANCE, D'ÉNERGIE ET DE QUALIMÉTRIE

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Les mesures de puissance et d'énergie concernent l'ensemble des utilisateurs des réseaux, qu'ils soient monophasés, triphasés voire même pour des applications types en continu dans le cadre de l'exploitation d'une installation, la gestion liée à la tarification et autre. De plus en plus, avec l'avènement de l'électronique de puissance, la qualité du courant, ainsi que parfois la tension, s'en trouve affectée, c'est pourquoi la quantification de certains paramètres liés à la qualité est indispensable à la bonne gestion d'une installation, qu'elle soit tertiaire ou industrielle.

9.1 Mesure de puissance

Objectif : la mesure de puissance dans les installations tertiaires ou industrielles de forte puissance permet d'identifier les pointes de charge, les pertes en ligne et de connaître les valeurs des grandeurs utiles d'une installation basse tension en vue de réaliser une maintenance aussi bien préventive que curative.

9.1.1 Rappels théoriques

■ Définition des puissances

Prenons un exemple tel que représenté *figure 9.1*.

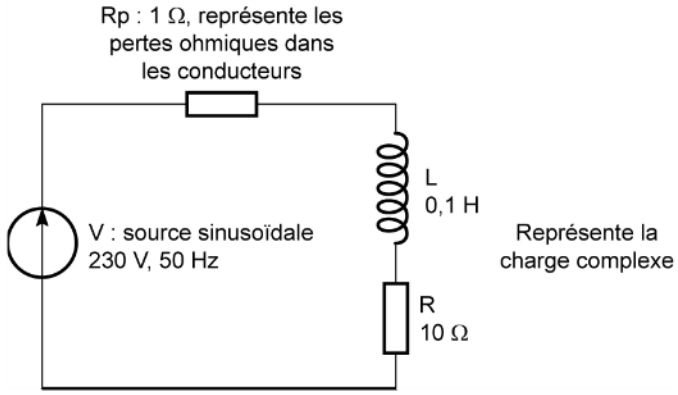


Figure 9.1 – Schéma électrique équivalent.

Les grandeurs du circuit sont les suivantes et correspondent à la représentation de la *figure 9.2* :

$$u(t) = U\sqrt{2}\sin\omega t$$
$$i(t) = I\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi)$$

φ étant le déphasage entre θ*u* et θ*i* en prenant θ*u* comme origine des phases.

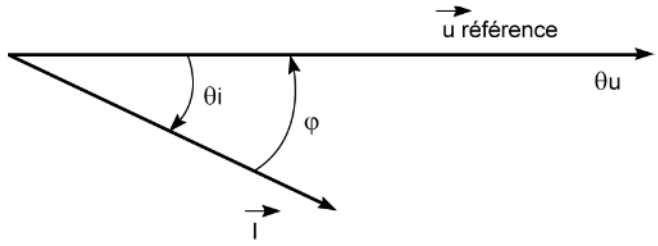


Figure 9.2 – Représentation de Fresnel du déphasage.

Lorsque l'on calcule $P(t) = U(t).I(t)$, la puissance instantanée, on obtient :

$$\boldsymbol{P(t) = U.I.\cos\varphi + U.I.\cos(2\omega t - \varphi)}$$

c'est-à-dire une **puissance moyenne** et une **puissance dite fluctuante** :

$$\boldsymbol{P(t) = \langle P\rangle + P_{\text{fluctuante}}}$$

Ce signal se présente sous la forme d'une **composante continue sur laquelle vient se superposer une sinusoïde de pulsation angulaire de 2ω**.
La composante continue correspond à la **puissance active** alors que la composante alternative de valeur moyenne nulle correspond à la **puissance fluctuante**.
Celle-ci ne transporte aucune énergie mais donne naissance à des oscillations de couples engendrant des vibrations et donc un surdimensionnement mécanique, voire des coûts supplémentaires.
À présent, si nous exprimons la puissance complexe *S* (puissance apparente) délivrée à la charge, on peut faire apparaître la puissance active *P* et réactive *Q* :

$$\boldsymbol{S = P + jQ}$$

La puissance réactive se mesure en var.
La puissance active est définie par :

$$\boldsymbol{\langle P\rangle = U_{\text{eff}}.I_{\text{eff}}.\cos\varphi}$$

Cette puissance donne naissance a un dégagement de chaleur, à un travail, c'est donc une grandeur physique qui se conservera quel que soit le système.
Mathématiquement, la puissance active se définit comme ceci :

$$\langle P\rangle = 1/T\int_0^T u(t)\,.\,i(t)\mathrm{d}t$$

si l'on intègre sur une période $U(t).I(t)$ le terme fluctuant disparaît. Ainsi la puissance réactive ne participe pas à la production d'un travail, par contre, le courant réactif circule bien dans les conducteurs et contribue à leur échauffement.
En multipliant les valeurs efficaces, on obtient la puissance apparente quelle que soit la valeur du signal (*figure 9.3*) :

– en sinusoïdale : $S = \sqrt{P + Q}$ $\quad \mathrm{tg}\,\varphi = Q/P$

– en complexe : $S = P + \mathrm{j}\,Q = S\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi} = U.I^* = U.I.\cos\varphi + \mathrm{j}\,U.I.\sin\varphi$

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

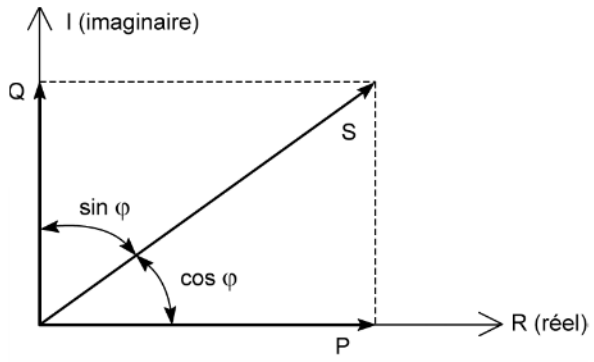


Figure 9.3 – Représentation vectorielle des puissances dans le plan complexe.

La puissance réactive s'obtient mathématiquement de cette manière :

$$Q = \langle U(t) . I(t + T/4) \rangle = \langle U(\theta - \pi/2) . I(t) \rangle$$

Il n'y a conservation de la puissance réactive qu'en régime sinusoïdal pur.
Revenons à notre circuit de départ (voir *figure 9.1*) pour en dégager le problème posé par cette puissance réactive.
Si l'on considère $Q = 1\,368$ var, on obtient $P = R\,I^2_{eff} = 434$ W. Si l'on supprime L_1, on aurait une charge résistive et un courant de 434/230, soit 1,88 A << 6,6 A, courant en partie réactif crée par la self.
Cette intensité n'a aucune influence sur la puissance moyenne fournie à R_1 mais concours à l'élévation de l'intensité efficace du courant traversant la résistance $R_{câble}$, d'où la production de pertes supplémentaires voire la destruction des câbles.
Conclusion : la puissance réactive n'affecte pas la puissance moyenne transmise à la charge, mais elle pénalise la source en lui demandant un courant efficace plus important.
Ce courant plus important va créer un échauffement au risque d'endommager les conducteurs.
Le compteur EDF comptabilise seulement la puissance active consommée par l'utilisateur, si cet abonné connecte au réseau des charges fortement réactives, il pénalise le distributeur, en forçant les génératrices à fournir un courant efficace plus élevé sans que celui-ci soit effectivement facturé.
Ainsi le distributeur d'énergie électrique demande aux abonnés de connecter des charges affectées d'un facteur de puissance global au moins égal à 0,93 soit une tgφ de 0,4.

■ Définition du facteur de puissance en sinusoïdal pur (*figure 9.4*)

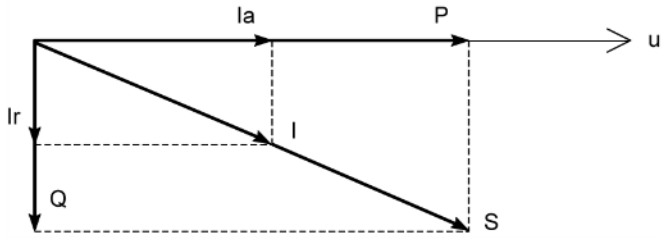


Figure 9.4 – Représentation vectorielle des puissances.

C'est le rapport de la puissance active sur la puissance apparente : $FP = P/S$
$FP = \cos\varphi$ avec φ déphasage entre tension et courant.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

$P = U.I.\cos\varphi$ toujours > 0 ou $P = U.I_{\text{actif}}$
$Q = U.I.\sin\varphi < 0$ si $\varphi < 0$ ou $Q = U.I_{\text{réactif}}$

$$S = U.I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

■ Définition du facteur de puissance en non sinusoïdal

Le FP est différent du cosφ car le FP tient compte du taux de distorsion.

En effet, la valeur efficace de l'intensité du courant s'écrit : $\sqrt{I_0^2 + I_{1\text{eff}}^2 + \ldots + I_{n\text{eff}}^2}$
Le courant efficace se décompose bien en une composante continue active P et réactive Q :

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{rms total}} = \sqrt{I_0^2 + I_{1\text{eff}}^2 P + I_{1\text{eff}}^2 Q + \ldots + I_{n\text{eff}}^2 P + I_{n\text{eff}}^2 Q}$$

Nous obtenons donc la puissance active en multipliant la tension d'entrée par le courant correspondant en phase avec celle-ci :

$$P = U_{\text{rms}}.I_{1\text{rmsp}}, \text{ avec } I_{1\text{rmsp}} = I_{1\text{rms(total)}}.\cos\varphi_1$$

d'où la puissance active devient :

$$P = U_{\text{rms}}.I_{1\text{rms}}.\cos\varphi_1$$

et la puissance apparente :

$$S = U_{\text{rms}}.I_{\text{rms(total)}}$$

Alors le facteur de puissance s'écrit :

$$FP = P/S = I_{1\text{rms}}.\cos\varphi_1/I_{\text{rms(total)}}$$

et comme $I_{1\text{rms}}/I_{\text{rms(total)}} < 1$, on définira un angle θ, lié à la présence d'harmoniques dans le courant : $\cos\theta = I_{1\text{rms}}/I_{\text{rms(total)}}$
$FP = \cos\theta.\cos\varphi_1$, nous pourrons ainsi faire intervenir le taux de distorsion global :

$$D = \sqrt{(\Sigma I_{n\text{rms}}^2{}^2)/I_{1\text{ rms}}} \text{ avec } n = 2 \text{ à } \infty$$

Ainsi le FP peut s'écrire : $FP = \cos\varphi_1/\sqrt{(1 + D^2)}$

$$FP = \frac{U_0 I_0 + \Sigma U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos 1}{\sqrt{U_0{}^2 + \Sigma U_{\text{eff}}^2}.\sqrt{I_0{}^2 + \Sigma I_{\text{eff}}^2}}$$

Sur la *figure 9.5*, nous remarquons les différentes influences des puissances et les angles correspondants :
$P = U_{\text{rms}}.I_{\text{rms}}.\cos\varphi$: puissance active
$Q = U_{\text{rms}}.I_{\text{rms}}.\sin\varphi$: puissance réactive
$S_1 = U_{\text{rms}}.I_{1\text{rms}}$: puissance apparente du fondamental

$D^2 = U_{\text{rms}}{}^2.\sqrt{\Sigma I_{n\text{rms}}^2}$: puissance déformante
$S^2 = P^2 + Q^2 = U_{\text{rms}}{}^2.I_{\text{rms}}{}^2$
$S^2 = U_{\text{rms}}{}^2.I_{1\text{rms}}{}^2 + U_{\text{rms}}{}^2.\Sigma I_{n\text{rms}}{}^2 = P^2 + Q^2 + D^2$
$S = U_{\text{rms}}.I_{\text{rms(total)}}$: puissance apparente totale

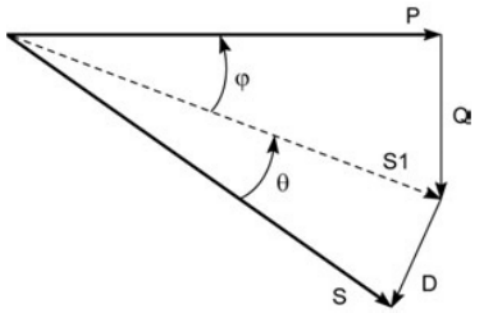


Figure 9.5 – Relevé de puissance instantanée. Triangle des puissances en régime non sinusoïdal.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Remarque

La puissance réactive et la distorsion de puissance engendrent une augmentation du courant RMS débité par la source.

Améliorer le FP passe par la réduction de ces deux phénomènes : φ_1 et θ doivent tendre vers 0.

Consommateurs d'énergie réactive

La consommation d'énergie réactive varie selon le type de récepteur : toutes les machines électriques utilisent une partie de la puissance apparente en énergie réactive pour aimanter leurs circuits magnétiques, indispensables à leur fonctionnement.
La proportion de l'énergie réactive par rapport à l'énergie active varie de 65 à 75 % pour les moteurs asynchrones et de 5 à 10 % pour les transformateurs.
Les inductances (ballasts de tubes fluorescents), les convertisseurs statiques (redresseurs, onduleurs) consomment de l'énergie réactive.

Facteur de puissance des principaux appareils électriques

Tableau 9.1 – Facteur de puissance de différents récepteurs.

Appareils		FP	Observations
Moteur asynchrone	Charge : 0 % 25 % 50 % 75 % 100 %	 0,17 0,55 0,73 0,80 0,85	Difficile à compenser, la charge étant variable
Lampe à incandescence Lampe à fluorescence Lampe à décharge		1 0,5 0,4 à 0,6	Ces lampes sont compensées dès l'origine, le cosφ est alors bon, sauf si le réglage se fait par gradateurs à thyristors
Four à résistances Four à induction Four à chauffage diélectrique Four à arc Four UHP		1 0,85 0,8 0,7	Une compensation doit être prévue par le constructeur
Machine à souder à résistances Poste statique monophasé de soudage à l'arc Groupe rotatif de soudage à l'arc Transformateur et redresseur de four à arc		0,8 à 0,9 0,5 0,7 à 0,9 0,7 à 0,9	⇒ sauf si le constructeur a prévu une compensation

Après avoir redéfini les différentes puissances, nous allons nous intéresser à présent à leur mesure au niveau du bâtiment.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

9.1.2 Applications

- Contrôles des charges et consommations en aval ou en amont des installations électriques aussi bien monophasées que triphasées.
- Mesure de la valeur des grandeurs suivantes : facteur de puissance, puissance active nominale.
- Résoudre les problèmes liés à un mauvais facteur de puissance (déphasage important courant/tension) afin de disposer d'un maximum de puissance disponible au secondaire du transformateur.
- Diagnostic préventif contre les risques d'échauffement (pertes Joules) dans les câbles.
- Contrôles du bon fonctionnement des groupes électrogènes (hôpitaux…), mesure de courant débité, équilibrage des phases.

9.1.3 Méthodologie

La mesure de la puissance active et du facteur de puissance se fait toujours par la mesure simultanée du courant et de la tension (par exemple jusqu'à 600 kW avec une pince de courant 1 000 A).

La fonction **mémorisation des instruments** permet d'effectuer des mesures comparatives en amont et en aval de lignes pour étudier notamment les pertes en ligne.

Le diagnostic électrique peut être complet (A, V, W, VA, VAR, FP, Hz) en monophasé ou triphasé du départ de l'armoire jusqu'aux éléments raccordés en aval tels que l'éclairage, les groupes moteurs, etc. (*figure 9.6*).

La fonction PEAK permet de localiser et d'éliminer les pertes de courant et de puissance : elle donne la valeur maximale du courant efficace, la valeur maximale de la puissance et de la tension efficace (temps minimum d'acquisition : 400 ms).

Le mode PEAK est très utile pour la mesure du courant de décrochage moteur, de la chute de tension et des pointes de puissance.

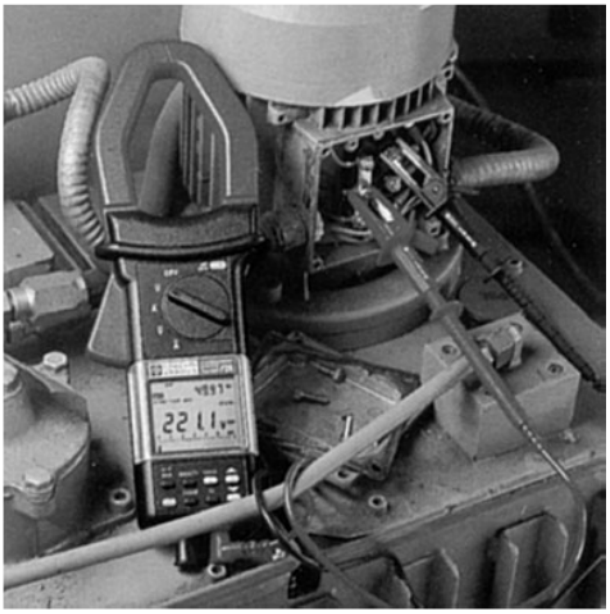


Figure 9.6 – Mesure sur plaque à bornes de moteur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Le choix d'un compensateur d'énergie réactive s'effectue par la mesure de l'énergie active consommée par l'installation et de son facteur de puissance :

$$Qc = P \times (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2)$$

avec Qc la valeur de la puissance de la batterie à installer, P la valeur de la puissance active consommée mesurée en kW et tgφ la valeur de la tangente φ de l'installation à compenser par la mesure du facteur de puissance.

Pinces multifonctions et wattmétriques

Les pinces multifonctions et les pinces wattmétriques ont pour objectif de mesurer la puissance en monophasé et en triphasé équilibré. Ces pinces combinent bien évidemment la mesure de tension et de courant en TRMS. D'autres fonctions comme la mesure du facteur de puissance, de la fréquence, de la continuité, de la résistance, le test de diode, accompagnent la simple mesure de puissance.

Certaines ne fonctionnent qu'en alternatif, d'autres en alternatif et continu (permettant ainsi les mesures TRMS), tout dépend du capteur mis en œuvre, l'effet Hall fonctionnant en AC et DC alors que le capteur de type transformateur de courant ne fonctionne qu'en alternatif.

Certaines pinces sont équipées de sortie RS232 pour permettre le transfert des paramètres mesurés et enregistrés vers un ordinateur afin de traiter les données grâce à un logiciel dédié.

Suivant les constructeurs la puissance mesurée (active, réactive, apparente), à partir des pinces wattmétriques, peut aller du watt à plusieurs centaines de kilowatt. Attention, certaines pinces 2 000 A vous demanderont pour des courants minimes de l'ordre de quelques ampères de former un toron et de diviser vos valeurs de courant et donc de puissance par le nombre de spires pour effectuer une mesure correcte. Bien entendu le mieux est encore de bien choisir le calibre de la pince wattmétrique au départ.

Pinces wattmétriques adaptées aux charges électriques modernes

Les pinces wattmétriques Fluke 345 ou Chauvin Arnoux F27 (*figure 9.7*) sont un outil idéal pour le dépannage de perturbations des charges monophasées et triphasées telles que les onduleurs, les variateurs de vitesse, les éclairages électroniques ou batteries (mesure de l'ondulation).

Elles mesurent les courants en AC/DC (jusqu'à 1 400 A AC TRMS), les tensions (jusqu'à 825 V AC efficace), les harmoniques (30e rang), les puissances (jusqu'à 1 200 kW AC), l'énergie (40 000 kWh).

La pince Fluke 345 possède des fonctions oscilloscope qui par son afficheur LCD couleur permet de visualiser les formes d'ondes les plus polluées. En effet un filtre passe-bas élimine les bruits haute fréquence adaptant cette pince aux charges de commutation actuelles. Leurs sorties numériques permettent de rapatrier les relevés sur PC par leur logiciel : Power Log chez Fluke et CA Transfer chez Chauvin Arnoux.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 9.7 – Pinces wattmétriques **(a)** Fluke 345 et **(b)** Chauvin Arnoux F27.

L'installation d'une pince multifonction passe par le branchement adéquat de celle-ci (*figure 9.8*).

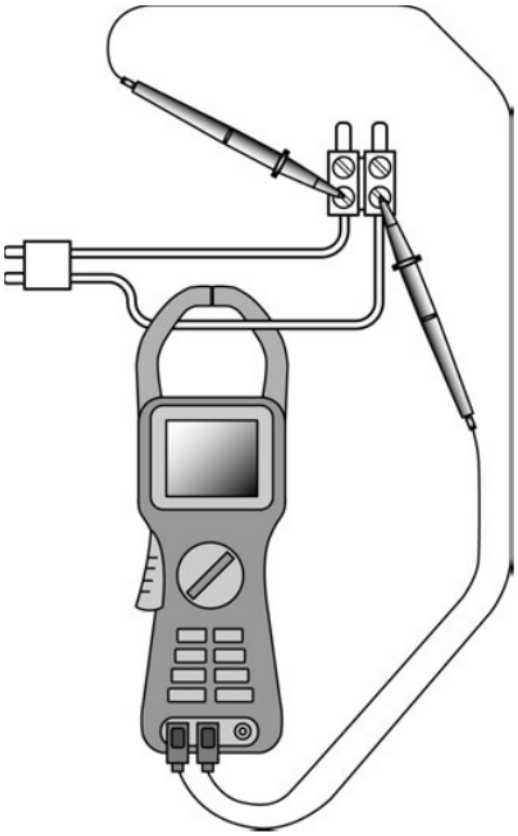


Figure 9.8 – Mise en œuvre d'une pince wattmétrique pour une mesure de puissance en monophasé.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

La mesure d'une puissance et/ou d'un facteur de puissance exige d'effectuer une mesure de courant et de tension simultanément. La mesure est ensuite directe car les puissances sont autocalibrées.

À titre d'exemple, nous vous communiquons les caractéristiques essentielles d'une pince multifonction :

– Pince AC ou AC/DC suivant le type de capteur utilisé (TI ou effet Hall).
– Courant (TRMS) : étendue (exemple : jusqu'à 1 500 A), précision typique, facteur de crête, réponse en fréquence, surcharge admissible.
– Tension (TRMS) : étendue (exemple : jusqu'à 600 V), précision typique, facteur de crête, réponse en fréquence, surcharge admissible, impédance.
– Fréquence : étendue 0,5 à 10 kHz, seuil de déclenchement 1 A ou 1 V, précision.
– Sortie analogique : étendue 1 mV/A ou 10 mV/A, précision typique, surcharge permanente admissible.
– Type d'alimentation : pile 9 V.

Fonctions supplémentaires :

– Mesures effectuées : courant, tension, fréquence, résistance., testeur de continuité, test de diodes.
– Hold : mémorisation des valeurs mini/maxi/moy.
– Entrée ADP : adaptateur pour sonde tachymétriques, thermométriques…
– Réglage automatique de l'offset en courant continu.

Afficheur :

– Deux niveaux de lecture : valeurs et bargraph.
– Affichages simultanés de deux grandeurs.
– Rétro-éclairage.

Ergonomie :

– Diamètre d'enserrage.
– Masse.
– Dimensions.

Normes : CEI 61010 Cat. III-2 (double isolation, degré de pollution 2, catégorie d'installation III, tension de service 600 V RMS), protections dues aux chocs, chutes… : CEI 68.2, CEM : CEI 801-2 à 5, indice de protection IP 40 (selon CEI 529).

L'organigramme de la *figure 9.9* apporte une aide au choix d'une pince multimétrique et wattmétrique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

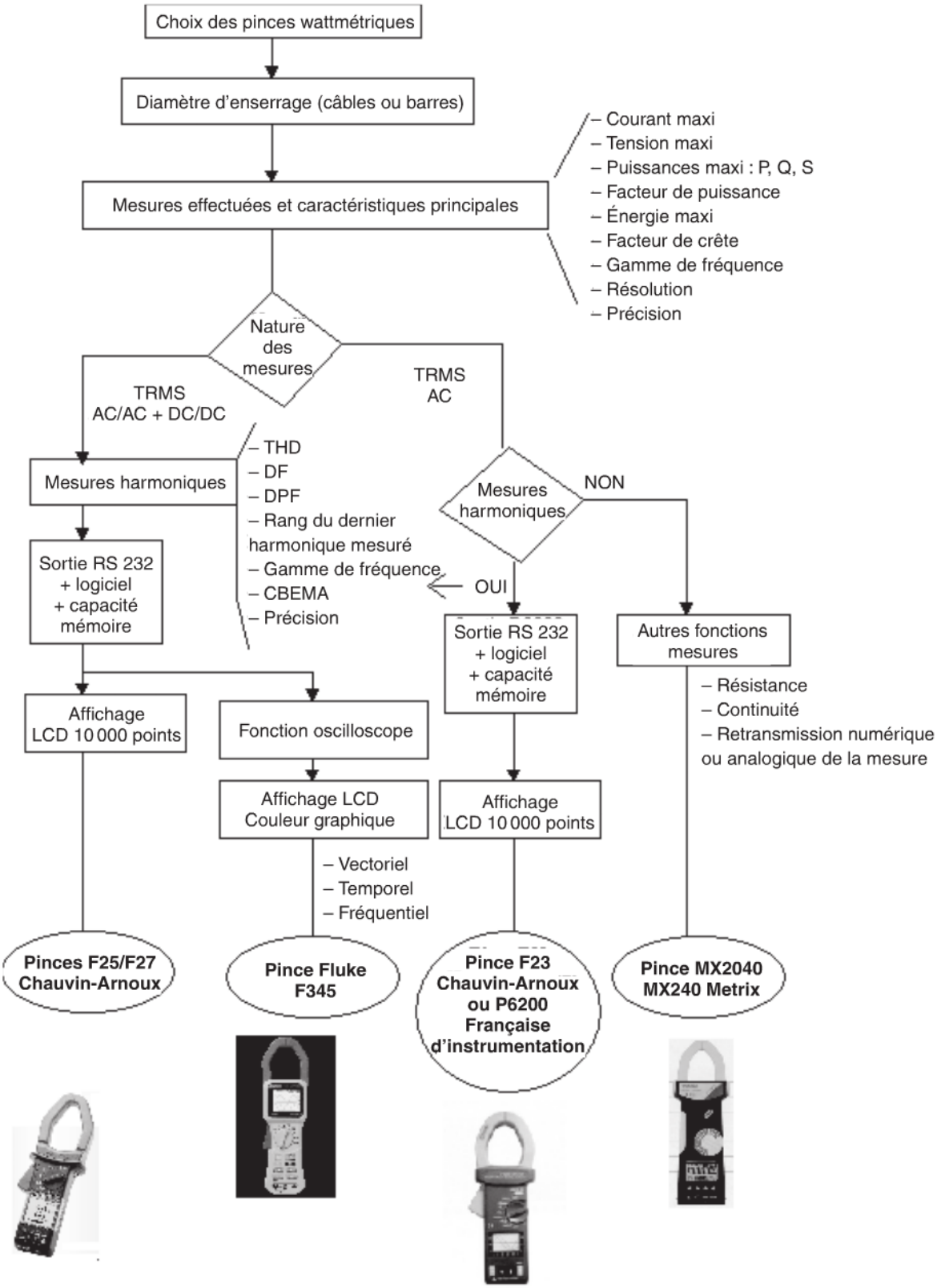


Figure 9.9 – Organigramme d'aide au choix d'une pince wattmétrique.

■ Pinces harmoniques

Le courant délivré par le réseau d'alimentation électrique français EDF est en courant alternatif sinusoïdal à la fréquence de 50 Hz. Or actuellement l'ensemble

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

des récepteurs électriques intégrant de plus en plus d'électronique de commande raccordée au réseau déforment les signaux électriques en tension et en courant. Ces charges sont dites « déformantes » car non linéaires, elles appellent sur le réseau des courants harmoniques.

Ces courants harmoniques sont des multiples de la fréquence de 50 Hz appelée aussi fondamentale.

Ainsi on définit le rang harmonique comme le rapport entre la fréquence de cet harmonique et la fréquence du fondamentale.

L'harmonique de rang 2 a une fréquence de 2 × 50 Hz = 100 Hz (*figure 9.10*).

L'harmonique de rang 3 a une fréquence de 3 × 50 Hz = 150 Hz (*figure 9.11*).

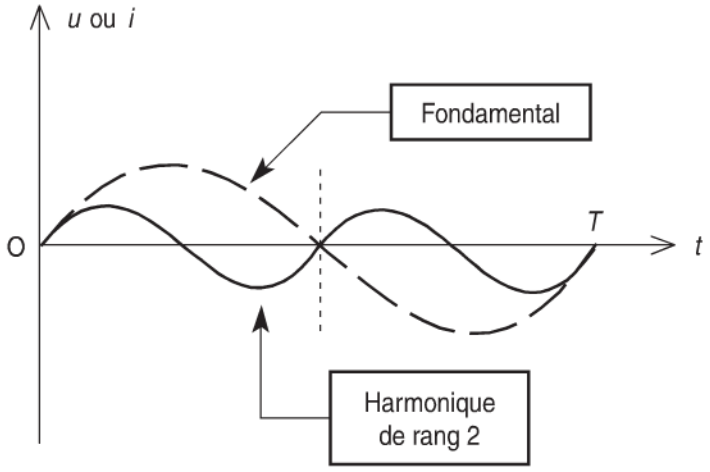


Figure 9.10 – Harmonique de rang 2.

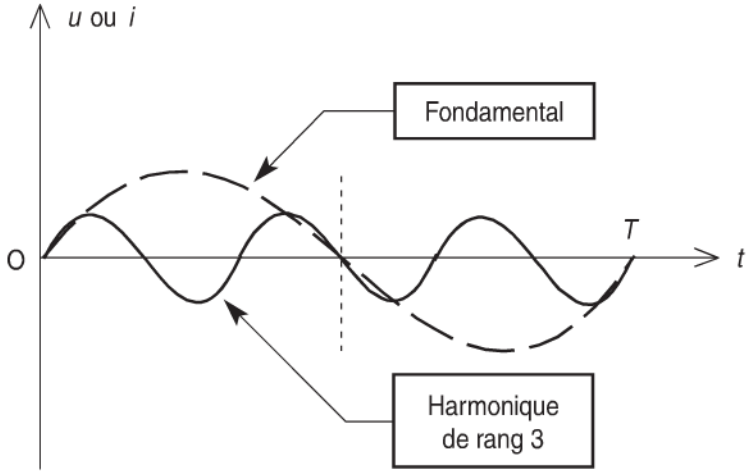


Figure 9.11 – Harmonique de rang 3.

☐ Caractérisation des courants harmoniques

On distingue les harmoniques de rang pairs (2, 4, 6, 8…) et les harmoniques de rang impairs (3, 5, 7, 9…) Ces derniers sont les plus influents notamment dans les réseaux électriques industriels, car ils affectent les signaux de manière symétrique (*figure 9.12*).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

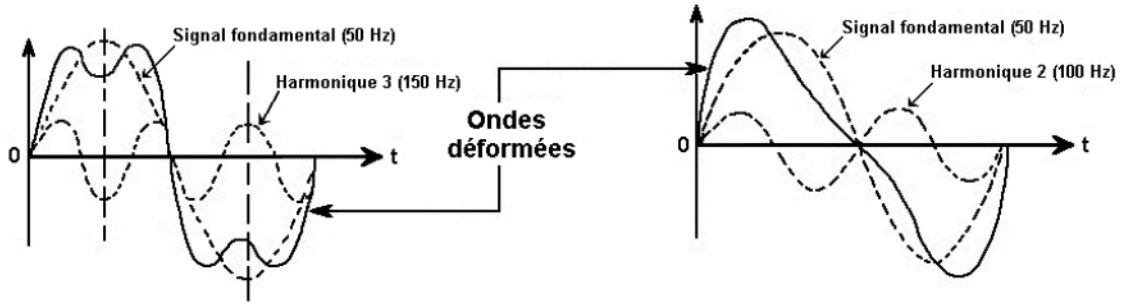


Figure 9.12 – Décomposition de signal par somme d'harmoniques (théorème de Fourier).

Toute onde de forme quelconque peut se décomposer en une somme de sinusoïdes élémentaires de fréquences multiples de celle du fondamentale (théorème de Fourier). La mise en évidence du théorème de Fourier est illustrée au travers de la *figure 9.13*.

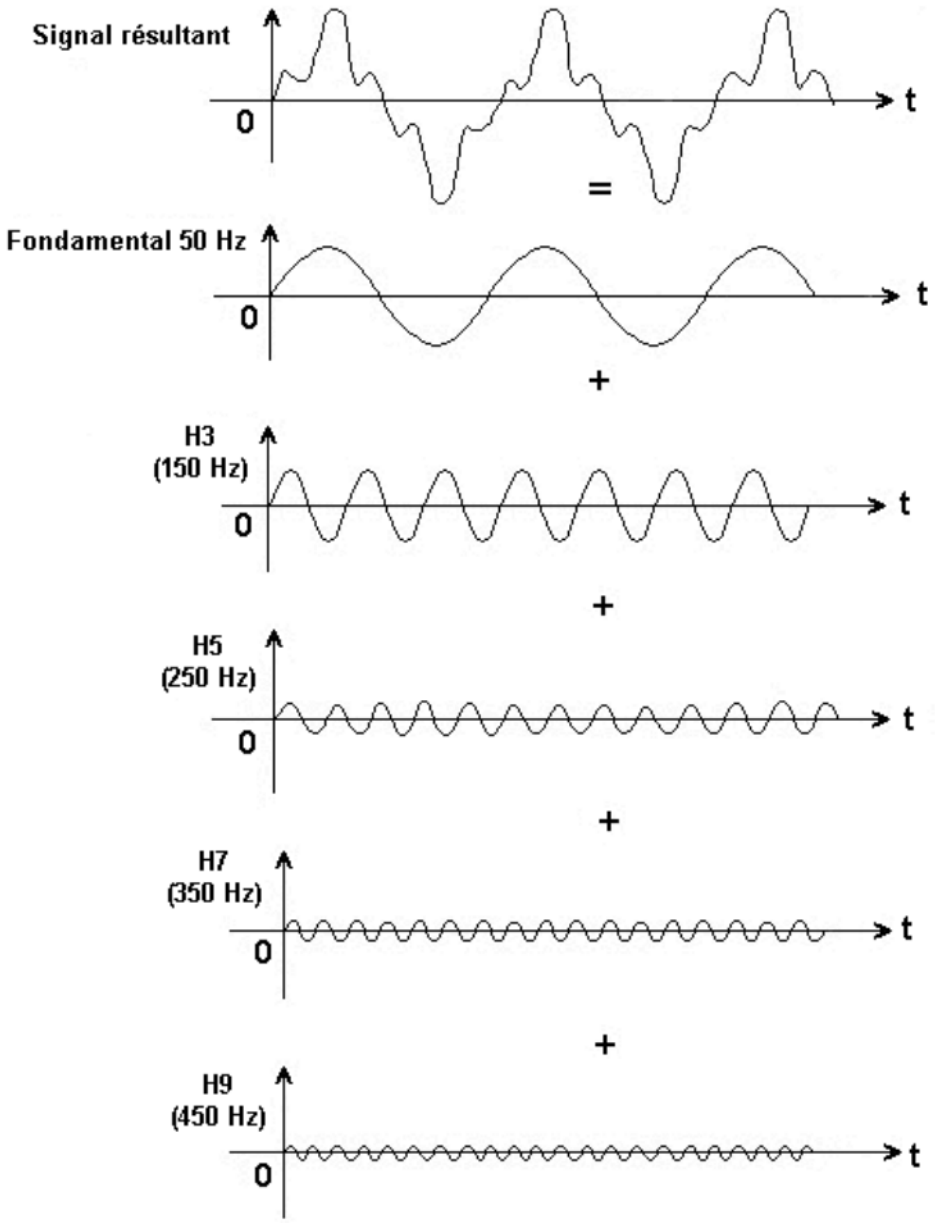


Figure 9.13 – Illustration du théorème de Fourier.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Chaque harmonique est défini par :

– sa valeur efficace (RMS),
– sa valeur crête (*peak*),
– son taux de distorsion global (THD),
– son facteur de distorsion (DF),
– sa puissance (active et apparente),
– son facteur de puissance, son déphasage par rapport à la tension.

$$C_n = \frac{A_n}{A_1}$$

☐ Calcul d'un courant efficace en présence d'harmoniques

Le calcul d'un courant efficace est proposé en exemple dans le cadre d'un circuit en présence d'harmoniques (*tableau 9.4*).

Tableau 9.4 – Exemple de calcul d'un courant efficace.

Rang harmonique	Intensité harmonique	Taux de distorsion harmonique
1	Ih1 = 100 A	100 %
3	Ih3 = 80 A	80 %
5	Ih5 = 60 A	60 %
7	Ih7 = 40 A	40 %
9	Ih9 = 16 A	16 %

La valeur efficace du courant est donnée par la relation :

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} i_n^2(t)}$$

soit

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{i^2 \text{ fondamental } Ih_3^2 + Ih_5^2 + Ih_7^2 + Ih_9^2 + \ldots}$$

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{100^2 + 80^2 + 60^2 + 40^2 + 16^2} = 147 \text{ A}$$

Facteur de distorsion :

$$DF = \frac{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=2}^{\infty} i_n^2}}{I_{\text{RMS}}} = \frac{\sqrt{Ih_3^2 + Ih_5^2 + Ih_7^2 + Ih_9^2}}{I_{\text{RMS}}} = \frac{108{,}8}{147{,}8} = 73{,}6\ \%$$

avec I_0 composante continue.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Taux de distorsion par rapport à la fréquence fondamentale :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2}}{I\text{fondamental}} = \frac{108{,}8}{100} = 108{,}8\ \%$$

Facteur de crête :

$$FC = \frac{I_{\text{crête}}}{I_{\text{RMS}}} = \frac{392}{147{,}8} = 2{,}65$$

Le facteur de crête est différent de $\sqrt{2}$. Le signal est déformé donc composé d'harmoniques.
Les résultats montrent la nécessité de pouvoir quantifier la déformation du signal et ceci est possible à l'aide d'une décomposition harmonique (ou série de Fourier) ou bien évidemment en utilisant les appareils de mesures d'aujourd'hui qui intègrent ces calculs : pince harmonique, centrale de mesure, oscilloscope avec FFT ou oscilloscope associé à son logiciel d'acquisition…

□ Origine de la pollution harmonique

De plus en plus les récepteurs sont des charges déformantes, les signaux électriques périodiques s'éloignent alors de la forme sinusoïdale pour prendre des formes très diverses.
Les courants harmoniques sont générés par des récepteurs électriques dont les caractéristiques varient en fonction de la tension comme les variateurs électroniques de vitesse, l'éclairage fluorescent équipé de ballast, les fours à arc, les onduleurs, les ASI (alimentations statiques ininterruptibles), et tous les équipements domestiques tels que les gradateurs de lumière, les ampoules fluorescentes, les téléviseurs, les micro-ordinateurs, équipements tous constitués d'alimentation à découpage.
On distingue deux types de charges à travers l'ensemble des matériels électriques vendus sur le marché :

– *Charge linéaire* : lampe à incandescence, résistance chauffante : le courant est en phase et a la même forme que la tension.
– *Charge non linéaire* : le signal est déformé, souvent de forme complexe et l'onde de courant est différente de celle de la tension, la charge est dite non linéaire.

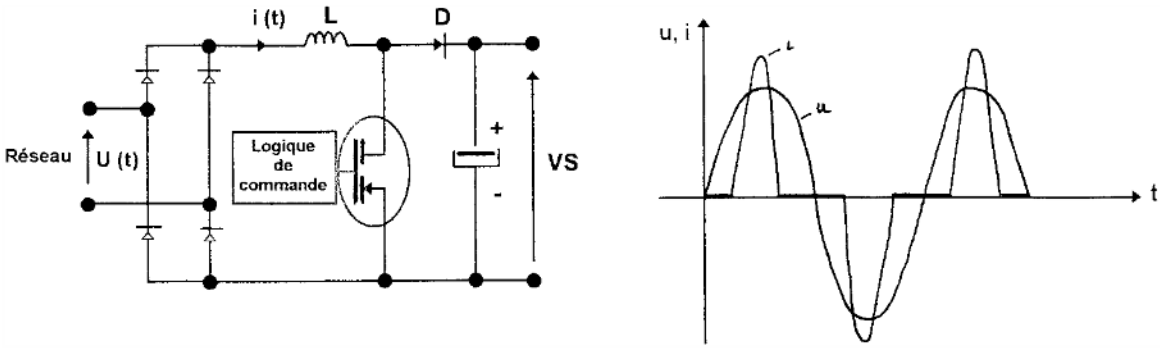


Figure 9.14 – Alimentation à découpage.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'alimentation à découpage (*figure 9.14*) ne laisse passer le courant que pendant une partie réglable de chaque demi-période. Le courant d'entrée impulsionnel est riche en harmoniques impairs (I3, I5, I7, I9…). Ces derniers, à travers l'impédance du réseau, créent des harmoniques de tensions qui déforment la sinusoïde. Beaucoup d'équipements informatiques ou bureautiques sont dotés de telles alimentations.

Moteurs asynchrones, alternateurs, transformateurs

Les imperfections dans les bobinages (dissymétries de fabrication) des moteurs asynchrones, alternateurs, transformateurs engendrent des courants harmoniques avec de faibles taux de distorsion ainsi que de possibles à-coups de couple.
Les onduleurs alimentent essentiellement les charges non linéaires (salles de systèmes, matériel informatique, système électronique sensible…). Le courant de sortie de l'onduleur est non sinusoïdal et à fort contenu d'harmoniques de rang impair.

Moteurs asynchrones pilotés par variateur de vitesse électronique

Il existe une grande variété de variateurs de vitesse des moteurs asynchrones.
La structure des variateurs est basée sur un redresseur et un onduleur. Suivant la structure du redresseur, le courant appelé au réseau sera plus ou moins déformé.
La structure de redresseur la plus répandue est celle du pont de Graëtz triphasé à six thyristors qui va générer des courants harmoniques de rang impairs (3, 5, 7…).
La circulation de ces courants dans les impédances de source va générer des harmoniques de tension, d'où une distorsion de la tension dont le taux sera fonction du type de redresseur.

Convertisseurs de fréquence à onde de courant

Le moteur est alimenté par une onde de courant d'amplitude et de fréquence variable (*figure 9.15*).

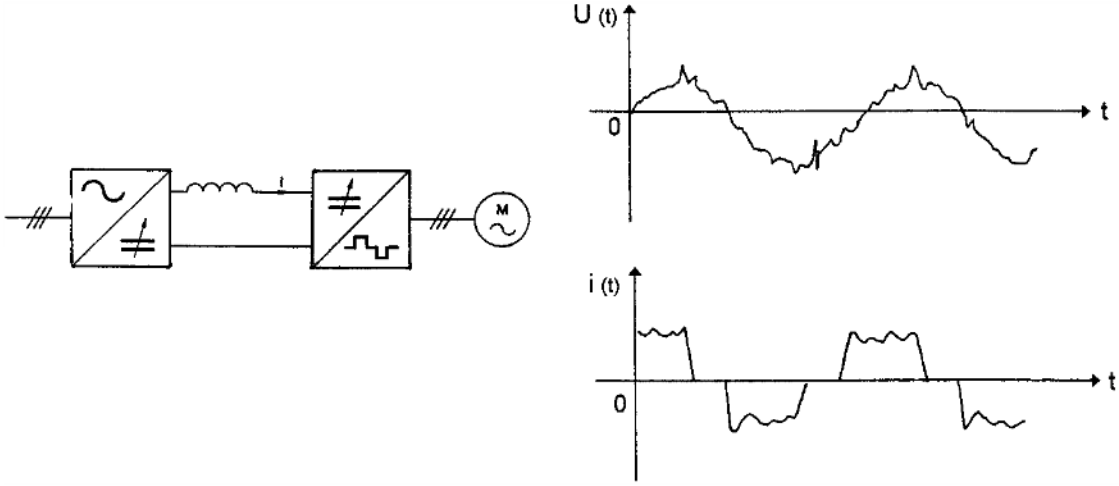


Figure 9.15 – Ondes de courant et tension à partir d'un convertisseur de fréquence.

Convertisseurs de fréquence MLI (modulation de largeur d'impulsion)

Le moteur est alimenté par une onde de courant d'amplitude et de fréquence variable (*figure 9.16*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

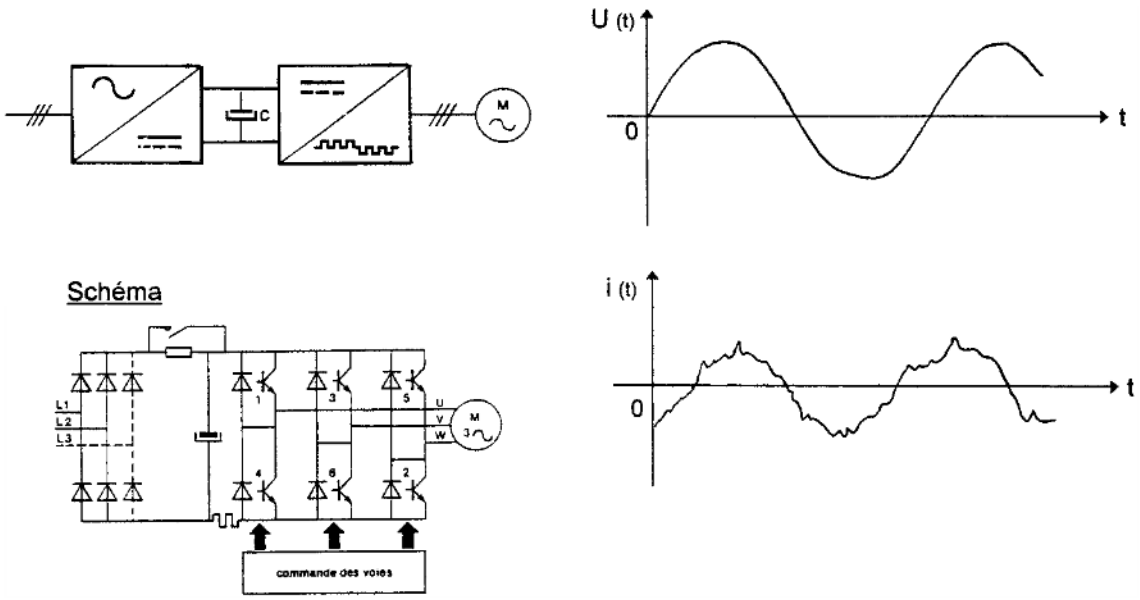


Figure 9.16 – Onde de courant et tension à partir d'un convertisseur MLI.

Fours à arc

Bien souvent de forte puissance (3 à 4 MVA) et le courant absorbé n'est pas périodique :

Éclairage fluorescent

Le courant consommé par un éclairage fluorescent doté de ballast n'est pas sinusoïdal et génère des courants harmoniques de rangs impairs (3, 5, 7…) tel que le représente la *figure 9.17*.

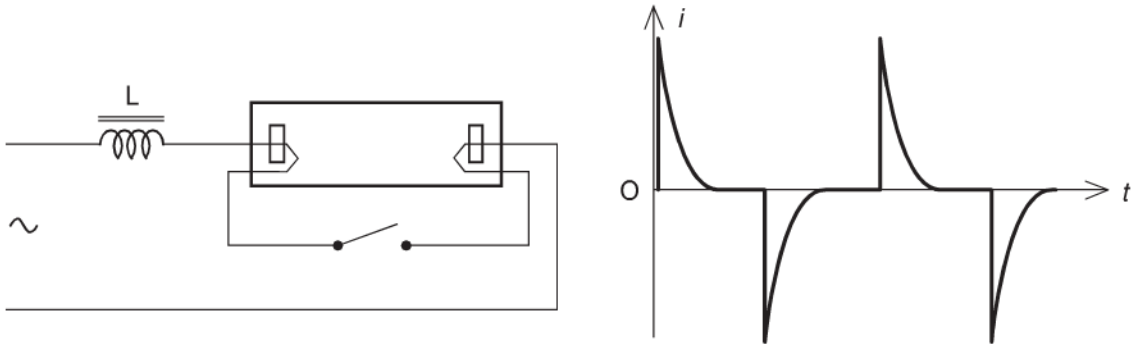


Figure 9.17 – Allure du courant absorbé par le tube fluorescent.

Gradateur de lumière ou démarreur progressif pour moteur asynchrone

Les lampes halogènes sont commandées par des thyristors de petites puissances qui viennent découper la sinusoïde de façon à rendre variable la valeur efficace de la tension d'alimentation ce qui va produire des harmoniques de rang impairs (3, 5, 7…) non négligeables et souvent perturbateurs pour l'ensemble du réseau (*figure 9.18*).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

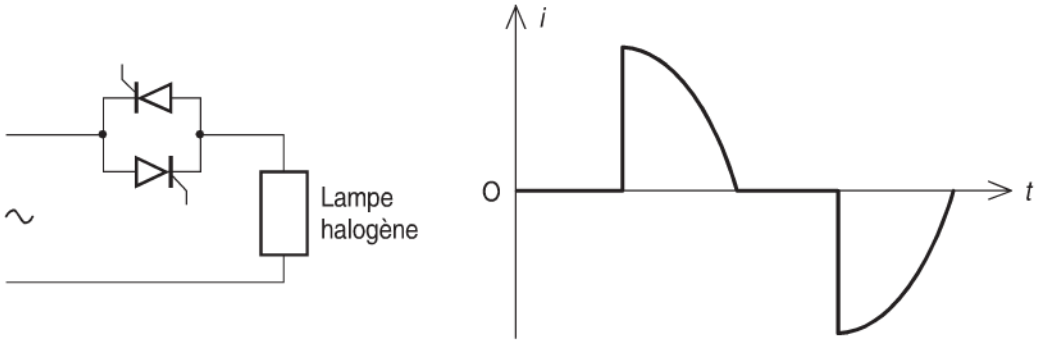


Figure 9.18 – Gradateur de lumière ou démarreur progressif pour moteur asynchrone.

Les démarreurs progressifs (*figure 9.19*) sont aussi basés sur une structure de gradateur à découpage de phase de façon à rendre variable la tension efficace et donc le couple dépendant de la tension au carré. Le découpage occasionné de la sinusoïde du réseau d'alimentation va engendrer des harmoniques de rang impairs.

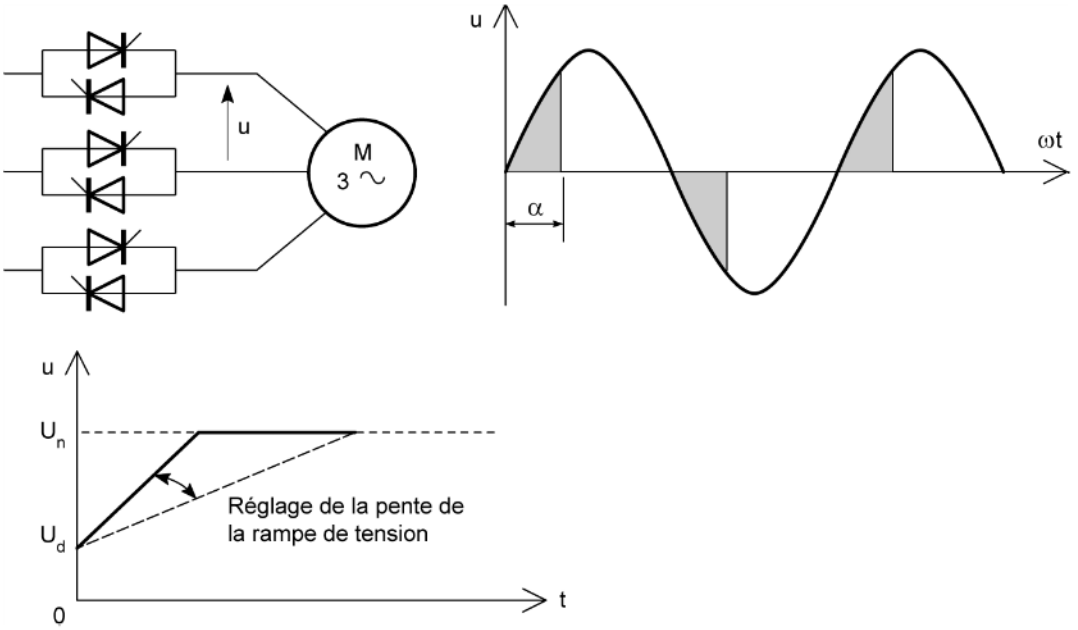


Figure 9.19 – Démarreurs progressifs.

Le gradateur permet en fonction de l'angle α de retard à l'amorçage des thyristors de délivrer une tension qui augmente progressivement à fréquence fixe.

☐ Effets des harmoniques

Ils sont de deux types (*tableau 9.5*).

Le *tableau 9.6* résume l'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 9.5 – Les effets des harmoniques.

Effets instantanés	Effets à moyen et long terme
Perturbations dans le fonctionnement des appareils de protection (relais, disjoncteurs, fusibles…). Réduction de la puissance des moteurs, surchauffe dans les câbles, transformateurs, disjonctions intempestives, augmentation du bruit dans les moteurs…	Échauffement des matériels électriques d'où un vieillissement prématuré des isolants et diélectriques. Réduction de leur durée de vie.

Tableau 9.6 – Les effets des harmoniques sur les différents matériels.

Nature du matériel électrique	Effet de la « pollution harmonique »
Machines tournantes, moteurs triphasés, alternateurs…	Échauffement supplémentaire (effet joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires entraînant une perte de stabilité mécanique des moteurs, augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courant de Foucault) et dans les enroulements (par effet joule). Risque de saturation si l'on a une présence d'harmoniques pairs.
Câbles	Augmentation des pertes ohmiques surtout dans le neutre où circulent les harmoniques de rang 3. Pertes diélectriques supplémentaires. Corrosion des câbles en aluminium sous l'effet des composantes continues (rang pair).
Électronique de puissance	Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde dans la synchronisation et la commutation des composants électroniques.
Condensateurs de puissances	Pertes diélectriques supplémentaires engendrant un vieillissement prématuré des condensateurs.
Ordinateurs	Dysfonctionnements liés aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques.
Dispositif de protection	Fonctionnement intempestif des protections.
Compteurs d'énergie	Erreurs de mesures.
Téléviseurs	Déformations de l'image.
Lampes à décharge	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de tension de rang 2.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Dans le conducteur de neutre, l'un des effets les plus connus est celui de la circulation des courants harmoniques dans le conducteur de neutre qui peut être nettement supérieur à celui qui circule dans les conducteurs de phase.
Comme le montre la *figure 9.20*, les courants harmoniques de rang 3, dans chacune des 3 phases, s'ajoutent dans le conducteur de neutre qui est parcouru par un courant de fréquence 150 Hz dont l'intensité est 3 fois celle dans chacune des phases, en supposant les charges équilibrées.

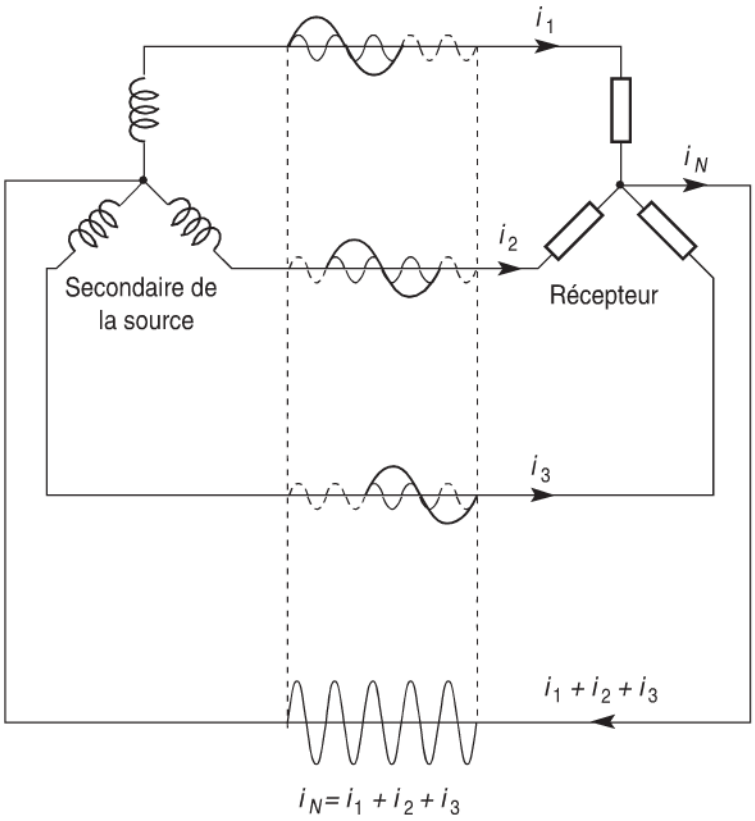


Figure 9.20 – Courant dans le neutre de fréquence 150 Hz et dont l'intensité est 3 fois celle dans chacune des phases.

Tableau 9.7 – Exemple de mesure montrant l'influence des harmoniques.

Courant harmonique	Valeurs en A	Taux de distorsion harmonique en %
Rang 1 = fondamentale	200	
Rang 3	160	80
Rang 5	140	70
Rang 7	115	57,5
Rang 9	70	35

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Le résultat du calcul du courant efficace (RMS) dans le conducteur de phase est obtenu de la manière suivante :

$$I_{\text{RMS}} \text{ phase} = \sqrt{I_n^2 + Ih_3^2 + Ih_5^2 + Ih_7^2 + Ih_9^2}$$

Remarque

On constate que le véritable courant RMS est de 1,6 fois la valeur du courant nominal I_n (200 A).

Courant dans le neutre : $I_{\text{neutre}} = 3\ Ih_3 = 3 \times 160 = 480$ A soit 2,4 fois le courant nominal I_n (200 A).
La section correspondant au courant nominal est de 70 mm^2 mais la présence des courants harmoniques nécessite d'augmenter la section des conducteurs de neutre et de phases :

– soit de 120 mm^2 pour les conducteurs de phases ;
– soit 210 mm^2 pour le conducteur du neutre.

Conclusion : on devra majorer la section des câbles d'une installation comportant des récepteurs susceptibles d'engendrer des courants harmoniques :

– de 70 % pour les conducteurs de phase ;
– de 300 % pour le conducteur de neutre.

C'est pourquoi la règle de la NFC 15-100 qui admet de prévoir un conducteur neutre de section moitié de celle des conducteurs de phase, ne peut qu'être appliquée que si les matériels électriques ne produisent aucun harmonique, à moins que la valeur des harmoniques soit sensiblement réduite.
La présence des pointes de surtensions générées par les courants harmoniques est caractérisée par le facteur de crête :

$$FC = \frac{I_{\text{crête}}}{I_{\text{RMS}}}$$

Les relevés de la *figure 9.21* montrent des courants ayant des facteurs de crête de 1,9 à 2,5.

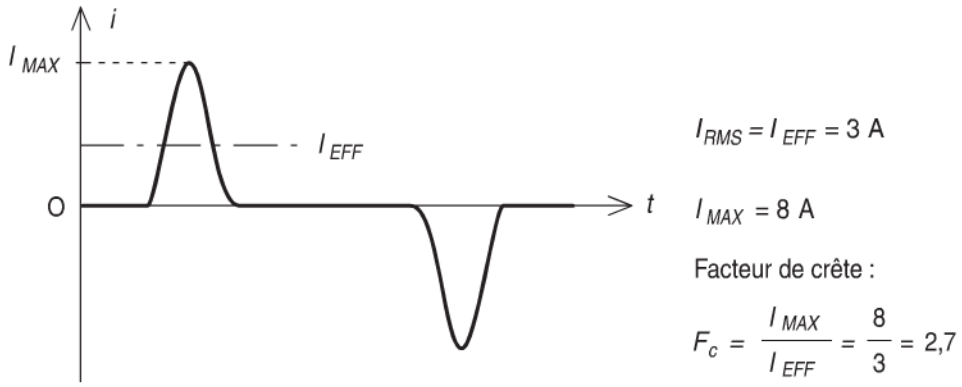


Figure 9.21 – Exemple de courant avec des facteurs de crête élevés 1,9 à 2,5.

Conclusion : les courants harmoniques provoquent des surtensions de faible valeur mais répétitives et engendrent un vieillissement prématuré des isolants des matériels électriques.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Remèdes contre la pollution harmonique

Cinq solutions sont alors envisagées pour lutter contre ce phénomène.

1° Diminuer le taux de distorsion harmonique

Première solution : utilisation de filtres passifs LC anti-harmoniques (*figure 9.22*) dont les caractéristiques sont déterminées par le constructeur de l'équipement. Ceux-ci sont constitués d'un ensemble de filtres RLC série accordé à la fréquence concernée.

Structure série : filtrage des fréquences supérieures à un rang considéré.

Structure parallèle : filtrage des fréquences inférieures.

Exemple de filtrage : le principe du filtrage consiste à placer des filtres résonnants séries accordés à la fréquence que l'on veut filtrer. Bien souvent les applications industrielles mettent en évidence l'utilisation fréquente des filtres de rang 5 et 7 et un filtre résonnant série amorti (de faible impédance) centré autour du rang 12.

$$FC = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

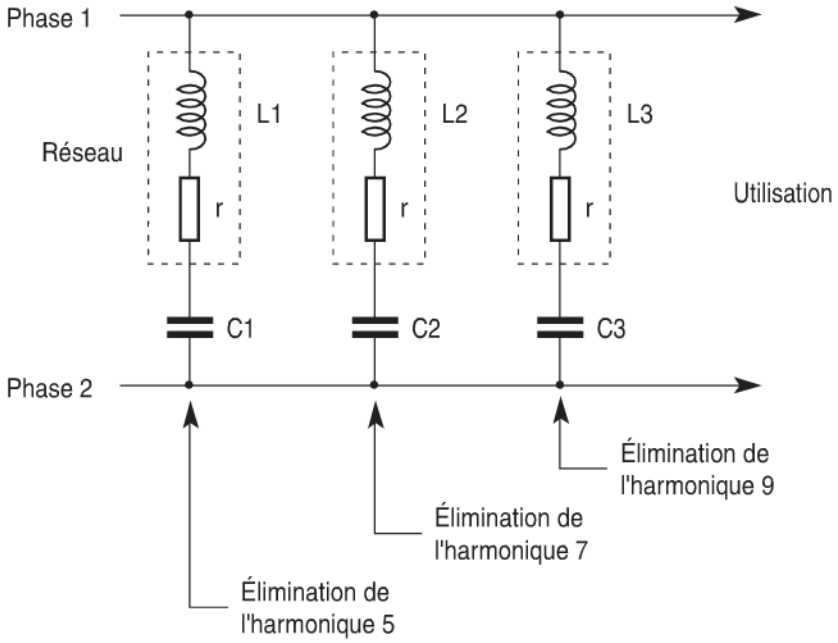


Figure 9.22 – Illustration d'un filtre passif LC.

L'utilisation de filtres peut donner lieux à des courants de fuite incompatibles avec certains régimes de neutre.

La conception de ces filtres et leurs installations nécessitent le soutien des services spécialisés tels que les bureaux d'études et les constructeurs.

Deuxième solution : alimenter chaque équipement par un transformateur individuel diminuant ainsi le taux de distorsion du fait que l'impédance ($Z = j\omega$) de l'installation devient plus faible.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

2° Prévoir un surdimensionnement

Il faut prévoir un surdimensionnement des équipements pouvant recevoir des surintensités dues aux harmoniques.
Les moteurs et les transformateurs sont calibrés pour un courant assigné au moins égal à 110 % du courant nominal.
La section du conducteur de neutre doit être au moins égale à celle des conducteurs de phase.
Les condensateurs de filtrage sont calibrés pour un courant assigné de 130 % du courant nominal d'emploi et une tension assignée égale à 110 % de la tension nominale de l'installation.

3° Choisir le type du redresseur en forte puissance

Le choix de la structure du redresseur va s'orienter vers le pont dodécaphasé (à 12 thyristors) qui va produire des harmoniques de rang impairs 11, 13, 23, 25 mais dont les rangs inférieurs sont faibles en amplitude, en tout cas largement plus faibles que ceux produits par un pont hexaphasé (à 6 thyristors).

4° Supprimer le risque de résonance

Afin d'éviter toute destruction des matériels, il faut éviter d'avoir une résonance dans le circuit. Le phénomène de résonance se produit dans un circuit constitué d'une self et d'un condensateur (par exemple des condensateurs chargés de relever le facteur de puissance) lorsque leurs caractéristiques électriques sont égales pour une fréquence particulière appelée *fréquence de résonance*.
Le phénomène de résonance impose une impédance amplifiée à la valeur de la fréquence de résonance. Le risque de résonance peut être évité en diminuant le rapport entre la puissance des condensateurs et la puissance de court-circuit au point de raccordement des condensateurs dans l'installation.
Il est également possible d'installer des condensateurs au primaire du transformateur alimentant l'installation considérée.

5° Neutraliser les harmoniques

On peut utiliser les « filtres actifs » (*figure 9.23*). Ces filtres vont injecter sur le réseau des courants harmoniques, équivalents mais en opposition de phase ayant la même intensité que ceux absorbés par les appareils et ce, grâce à ce système asservi.

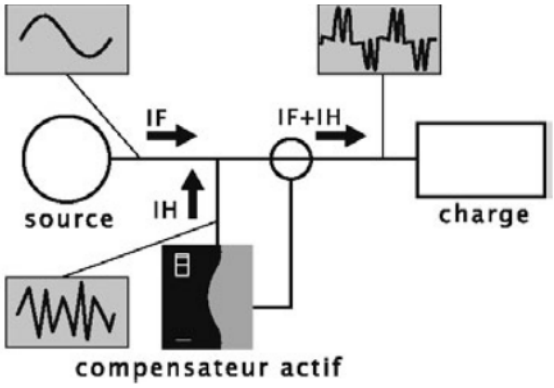


Figure 9.23 – Principe du Sinewave de Schneider.

Ils assurent ainsi l'annulation des courants harmoniques dans le circuit concerné.
Ces filtres peuvent aussi intervenir en complément des filtres passifs et s'adaptent en permanence à la demande en harmoniques.
Les alimentations récentes intègrent ces dispositifs, on parle d'alimentation à absorption sinusoïdale.
Le principe consiste à asservir le courant en sortie du redresseur à la tension secteur quasi-sinusoïdal pour le rendre sinusoïdal et en phase celle-ci. La charge sera perçue côté réseau comme « résistive » et le récepteur tirera pleine puissance du secteur.
On nomme ce procédé *alimentation à facteur de puissance unitaire.*
La structure de ce convertisseur continu/continu devra être mono-étage pour des raisons de prix de revient (très bas destiné au marché du grand public) et de fiabilité.
Le procédé permet de retrouver un courant quasi-sinusoïdal côté secteur alors que notre charge est loin d'être linéaire !

□ Mesure de la pollution harmonique

La détermination par le calcul des courants harmoniques est souvent longue et nécessite des moyens informatiques de traitement conséquents.
Cependant il existe des appareils mesurant automatiquement le niveau de pollution harmonique.
Exemples des caractéristiques des appareils mesurant les harmoniques :
– Mesure des courants en TRMS (de 50 mA à 700 A) de 15 Hz à 10 kHz et 1 000 A crête.
– Mesure des tensions en TRMS (de 50 mV à 600 V) de 15 Hz à 10 kHz et 1 200 V crête.

Lecture directe des paramètres suivants :
Taux de distorsion harmonique total (THD) en % de 0,5 % à 600 % :

$$THD = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_n^2}{I_n^2}}$$

Le taux de distorsion harmonique constitue alors le paramètre essentiel de qualification de l'installation électrique en terme de pollution harmonique.
Ce taux est le quotient des composantes fréquentielles sur la composante fondamentale.
Valeur du THD pour des signaux typiques :
– sinusoïde : THD = 0 %
– triangle : THD = 12 %
– carré : THD = 46 %

Facteur de distorsion (DF) en % de 0,5 % à 600 % : le facteur de distorsion est le quotient suivant :

$$DF = \sqrt{\frac{A_1^2 - A_2^2 + A_3^2 + \ldots + A_n^2}{X_i^2}}$$

A_0 : composante fondamentale.
$A_2 \ldots A_n$: amplitude de chaque composante fréquentielle.
X_i : signal total.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Pour caractériser la décomposition d'une onde de tension ou de courant harmonique, on utilise la représentation spectrale indiquant le taux harmonique en fonction de la fréquence.
Fonctions de la plupart des pinces harmoniques :
Facteur de crête : de 1 à 10.
Fréquence : de 0,5 Hz à 10 kHz.
Valeur de crête (*peak*) : 1 ms.
Enregistrement des min/max/moy pendant un temps supérieur à 24 heures afin d'analyser les phénomènes sporadiques ou fluctuants.
Visualisation directe des valeurs des mesures de courants, tensions, puissances et/ou des ondes de tensions, courants, puissances et/ou des spectres harmoniques.
Mémorisation des relevés, des valeurs et des spectres harmoniques comme ci-avant.
Transfert par liaison RS232 et analyse sur PC à l'aide d'un logiciel constructeur.
DPF (*Displacement Power Factor* ou facteur de déplacement de puissance) : le DPF ne prend pas en compte les harmoniques à l'inverse du facteur de puissance, il indique simplement le facteur de puissance calculé sur le fondamental U et I et correspond à la notion de cosφ.

$$DF = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 - U_n^2}{U_n^2}}$$

Prenons l'exemple suivant concernant une alimentation à découpage (*figure 9.25*) : $U = 400$ V, $I = 150$ A.
Harmoniques de tension (DF) H3 = H7 = 1 % et H9 = 2 %
Harmoniques de courant (DF) H3 = 50 %, H5 = 15 %, H7 = 5 %, H9 = 2,5 %
Les calculs montrent que le facteur de puissance vaut 0,72, le DPF ou cosφ = 0,82.
La *figure 9.24* illustre cet exemple :

– Le déphasage est mesuré en reconstituant le fondamental U et I par calcul.
– Le résultat est de 0,1 d'écart sur le cosφ, ce qui est loin d'être négligeable.

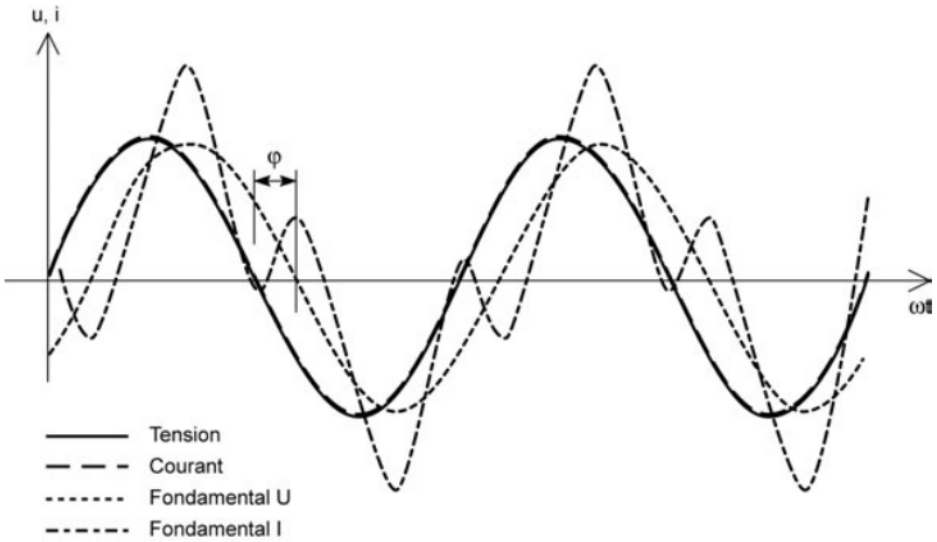


Figure 9.24 – Relevé illustrant l'allure du courant dans une alimentation à découpage.

THDF (*Transformer Harmonic Derating Factor*) = $\sqrt{2}$/facteur de crête appelé aussi facteur CBEMA (Computer Business Equipement Manufacturers Association : regroupement des constructeurs de matériels informatiques américains). Il s'agit de déclasser la puissance nominale des transformateurs en présence d'harmoniques.

Exemple : sur un secondaire de transformateur on mesure 100 A RMS avec *CF* (facteur de crête) = 2 *THD* = $\sqrt{2}/2$ = 70 % si le transformateur a une puissance de 60 kVA, sa valeur déclassée devient 60 × 70 % = 42 kVA soit un courant max de 105 A RMS (aussi 150 A × 70 % = 105 A) avec 100 A RMS nous sommes à la limite.

Facteur *K* : il indique la quantité de chaleur produite par des courants sinusoïdaux par rapport à la même valeur efficace de courant sinusoïdal pur. Sa relation est la suivante :

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n^2 \tau_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} \tau_n^2}$$

où τ est le taux d'harmonique partiel de chaque rang.

On voit que les harmoniques de rang élevé ont beaucoup plus d'importance que les harmoniques proches de 50 Hz.

Les harmoniques de rang élevé se développent souvent à travers des résonances. Ces derniers sont la cause de la présence des condensateurs de rephasage. Les transformateurs sont classés en fonction de leur capacité à dissiper l'excès de chaleur. Couramment on trouve des valeurs de *K* de 4 à 30 voire 40.

On utilise le facteur *K* pour :

- déclasser un transformateur en puissance afin d'éviter sa surchauffe ;
- acquérir un transformateur avec le bon *K* en cas de remplacement de l'ancien car il est moins coûteux d'acheter un transformateur avec le bon coefficient *K* que d'en installer un surdimensionné car les protections sont dimensionnées par rapport à la puissance maximale et revient plus cher que le surcoût du coefficient *K*.

Exemple : un transformateur a été mesuré avec *K* = 2,7 ce qui veut dire qu'il y aura 2,7 fois plus de chaleur produite par les courants harmoniques que par la même valeur du courant efficace d'un courant sinusoïdal. Avec une valeur identique de courant TRMS non sinusoïdal, le transformateur aura 2,7 fois plus de chaleur à dissiper.

□ Normalisation

Les règles relatives à la compatibilité électromagnétique CEI 61000-3-2 et aux caractéristiques des alimentations en énergie électrique EN 50160 fixent les limites pour les valeurs des taux d'harmoniques et les six autres critères exposés dans le *tableau 9.8*.

Ces valeurs sont en pourcentage de la tension nominale.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 9.8 – Valeurs en pourcentage des taux d'harmoniques fixées par la norme.

Rang de l'harmonique	Taux en %
3	5
5	6
7	5
9	1,5
11	3,5
13	3
15	0,3
17	2
19	1,5
21	0,2

Pour le taux global les valeurs à ne pas dépasser sont :

– en basse tension : 8 %
– en moyenne tension : 7 %
– en haute tension : 3 %

Recommandations du distributeur EDF :

– limitations des tensions harmoniques de rangs pairs < 6 % de la tension nominale,
– limitations des tensions harmoniques de rangs impairs < 1 % de la tension nominale,

soit une limitation de la distorsion totale en tension à 1,6 %.

Différentes perturbations selon la norme EN 50160 et leur critérisation :

– Coupures.
– Creux de tension, surtensions.
– Fluctuations lentes.
– Fluctuations rapides.
– Déséquilibres.
– Fréquence.
– Harmoniques.
– Signaux de télécommande.
– Variation rapide de tension (RVC).

Coupures et creux de tensions (figure 9.25)

Ici, la norme donne des valeurs indicatives.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

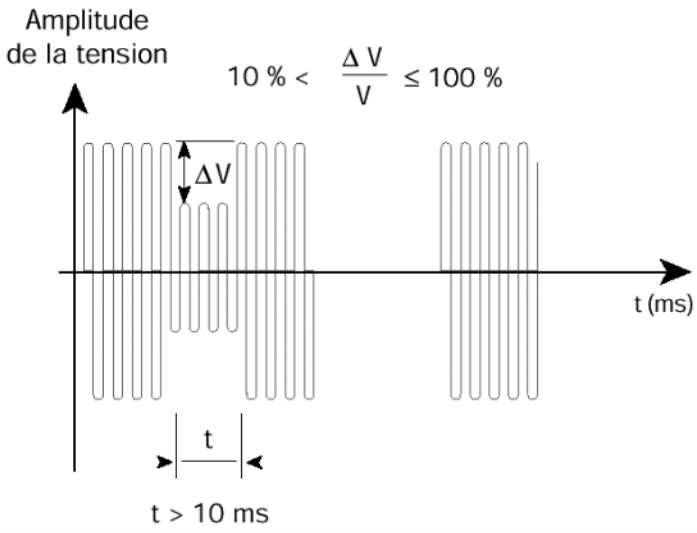


Figure 9.25 – Coupures et creux de tension.

Coupures brèves de tension

En utilisation normale, il se produit de brèves coupures avec une fréquence variant de 10 à 100 événements par an.
La durée reste en général inférieure à 1 s.

Coupures longues de tension

De durée supérieure à 3 min, ces événements sont considérés hors du domaine de validité de la norme et pour lesquelles il n'est pas possible de donner de valeurs indicatives.
Origine : effets imprévisibles des intempéries et causes externes.

Creux de tension

Diminution de la tension en dessous de 90 % de *Un*.
Le nombre de creux peut varier de 10 à 10 000 durant une année.
La plupart ont une durée inférieure à 1 s et un niveau le plus bas de 60 % de *Un*.
Origine : appel de courant important sur le réseau, démarrage de récepteur forte puissance, défaut sur le réseau (court-circuit, défaut de terre, commutation de charge).

Surtensions (figure 9.26)

Origine : foudre, fusion de fusible, enclenchement de condensateur, coupure de contacteur…

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

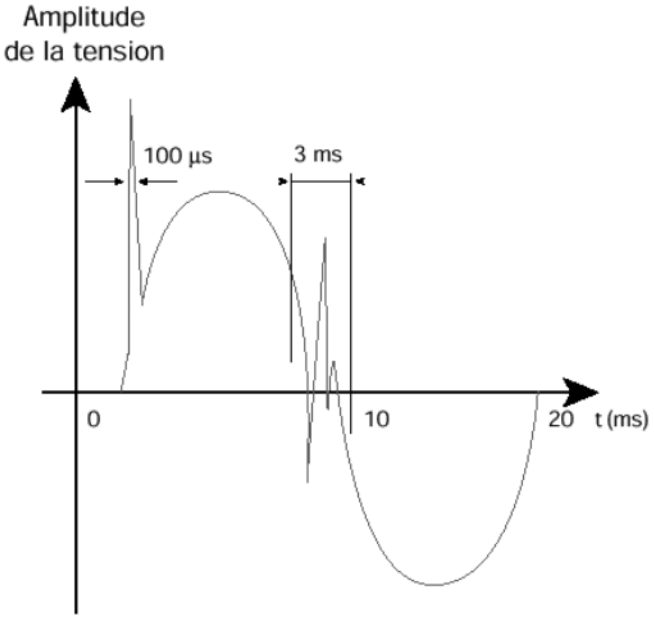


Figure 9.26 – Surtensions.

Surtensions temporaires

En basse tension : la surtension peut atteindre la valeur de tension entre phase, à cause du déplacement du point de neutre du réseau triphasé.

En moyenne tension :

– réseau neutre à la terre, raccordé directement ou avec impédance, la surtension ne devra pas dépasser 1,7 *Uc*.
– réseau à neutre isolé ou résonant, elle ne devra pas dépasser 2,0 *Uc*.

Surtensions transitoires

Entre phase et terre, les surtensions ne dépassent généralement pas 6 kV.

Le temps de montée peut varier de quelques microsecondes à plusieurs millisecondes.

Variations lentes (figure 9.27)

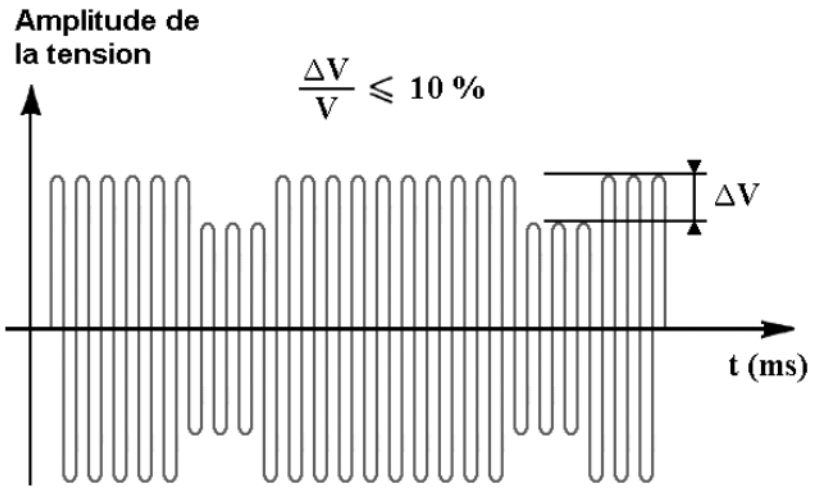


Figure 9.27 – Variations lentes.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Origine : élévation ou baisse de la valeur efficace de la tension (ΔV) en raison d'une variation de charge sur le réseau.
EN 50160 : 95 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans la plage définie de tension nominale $Un \pm 10$ %.

Variations rapides « flicker »

EN 50160 : variation rapide de tension, ne dépasse généralement pas 5 % de *Un* (*figure 9.28*).

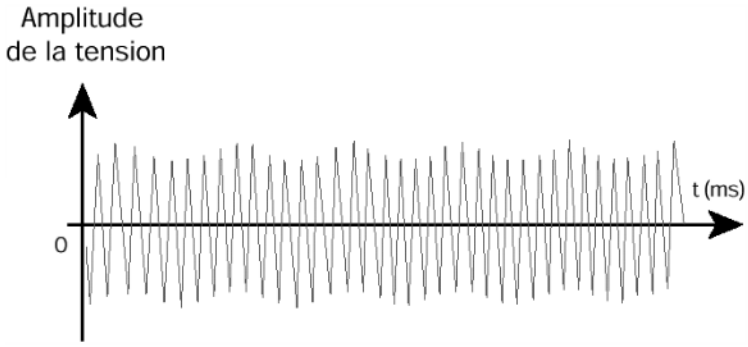


Figure 9.28 – Variations rapides.

Sévérité du papillotement ou flicker

EN 60868 : pour chaque période d'une semaine, le niveau de sévérité de longue durée du papillotement lié aux fluctuations de la tension, le Plt, doit être inférieur ou égal à 1 pendant 95 % du temps.

Origine :

- fonctionnement de certains appareils à charge fluctuante (soudeuse, four à arc),
- mise en service de gros moteur avec courant d'appel élevé,
- variations de la charge dans les installations des clients ou de manœuvre sur le réseau.

Pour prendre en considération les mécanismes de la vision et établir une méthode représentative de la gêne, le flicker doit être évalué sur une période de temps suffisamment représentative. De plus, en raison de la nature aléatoire du flicker provoquée par certaines charges, il faut admettre que pendant cette période le niveau instantané de flicker peut varier considérablement et de façon imprévisible. Un intervalle de 10 minutes a été jugé comme étant un bon compromis. Il est assez long pour éviter d'accorder trop d'importance à des variations isolées de tensions. Il est aussi assez long pour permettre à une personne non avertie de remarquer la perturbation et sa persistance, mais il est en même temps assez court pour permettre de caractériser de façon fine un matériel perturbateur avec un long cycle de fonctionnement. Les gênes sont détectées à partir d'un Pst égal à 1.

Variation de fréquence (figure 9.29)

EN 50160 : la valeur moyenne de la fréquence fondamentale mesurée pendant 10 s sur des réseaux de distribution doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz ± 1 % pendant 95 % d'une semaine.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

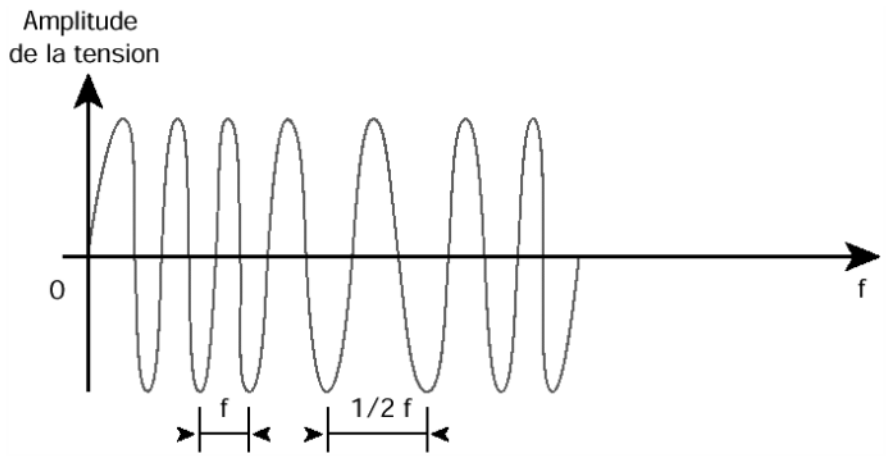


Figure 9.29 – Variations de fréquence.

Déséquilibre

EN 50160 : le déséquilibre est défini par l'écart de symétrie du système triphasé, caractérisé par l'égalité des modules de tension en valeur efficace et leurs déphasages relatifs.
Pour chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces calculées sur 10 minutes de la composante inverse de la tension d'alimentation doivent se situer entre 0 et 2 % de la composante directe.

Harmoniques et inter-harmoniques

Origine : présence de charges non linéaires sur le réseau.
EN 50160 : la valeur moyenne sur 10 minutes de la valeur efficace des harmoniques ne doit pas dépasser la valeur limite définie, pour chaque rang, en pourcentage de la tension nominale Un pendant 95 % d'une semaine.
Exemple : H3 : 5 %, H5 : 6 %, H7 : 5 %, H9 : 1,5 %, H11 : 3,5 %…
Le taux global d'harmoniques (THD) ne doit pas excéder 8 % de l'amplitude de la fondamentale.

Variations rapides de tension

Les variations rapides de tension sont issues des enclenchements de charge et l'amplitude ne doit pas excéder + 5/– 5 % de la tension nominale ou de la tension déclarée.
Voir norme CEI 61000-4-30.

☐ Applications possibles

Armoires électromécaniques :

- Mesures des courants sur jeu de barre en amont de la ligne.
- Mesure sur chaque phase des courants harmoniques jusqu'au 25e rang avec sur chaque rang la valeur du THD (%) et du DF (%) et de la fréquence.
- Mesure du niveau de pureté de la tension sur chaque phase avec un diagnostic harmonique précis.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Enregistrement des valeurs minimales, maximales et moyennes de tous les harmoniques de courants avec un contrôle en fréquence pour chaque rang d'harmonique.

Alternateur :

– Mesure de la pureté du courant en sortie d'alternateur notamment l'onde fondamentale du courant. Contrôle du THD global en tension (%).
– Mesure directe du facteur de crête du courant sur chaque phase.
– Vérification de la stabilité de la fréquence délivrée par l'alternateur.

Transformateur triphasé basse tension :
Diagnostic harmonique :

– Mesure de la composante harmonique tension, courant avec valeur du THD, du DF, de la fréquence sur chacune des phases et le neutre.
– Possibilité d'horodater l'enregistrement de la tension ou des courants harmoniques lors du diagnostic par préprogrammation de la pince.
– Mesure du courant *peak* lors de l'enclenchement de la charge du transformateur.

Le diagnostic harmonique permet de détecter un taux d'ondulation trop important lié à un filtrage mal adapté au redresseur perturbant la charge (*figure 9.30*).

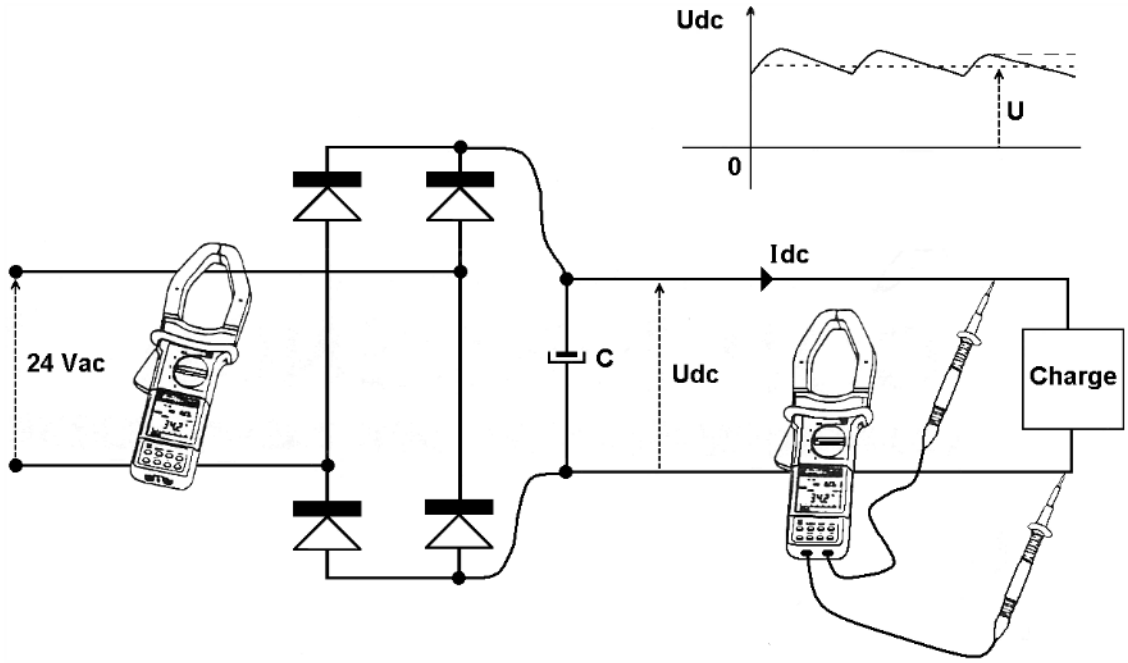


Figure 9.30 – Exemple de diagnostic harmonique.

Action corrective :

– La pose de filtres sélectifs anti-harmoniques par self série ou capacité parallèles permet d'éliminer les rangs harmoniques dominants notamment les rangs 3, 7, 9, 11…
– Le surdimensionnement du conducteur de neutre évite la surchauffe de celui-ci lors de la présence d'harmoniques dans le circuit.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Onduleurs (alimentation statique ininterruptible, ASI) :

- Scrutation rang par rang des harmoniques de courant en entrée/sortie de l'onduleur.
- Affichage simultané de courant débité et de la fréquence de l'onduleur.
- Mesure directe du facteur de crête en courant.
- Mesure du THD (%) global en tension avec 100 % de charges non-linéaires
- On constate souvent une disparité entre les valeurs des taux d'harmoniques en courant en amont et en aval d'un onduleur car tout dépend de la technologie de celui-ci et de la charge raccordée.

Moteurs asynchrones pilotés par variateurs de vitesse :

- Mesure en aval du variateur de vitesse :
- Mesure de l'intensité (TRMS) nominale moteur sur chaque phase.
- Mesure simultanée du courant/fréquence en fonction de la consigne assignée au moteur.

Mesures et enregistrement des valeurs crêtes en courant lors du démarrage par exemple.

Mesure en amont du variateur de vitesse :

- Mesure du facteur de crête en courant sur chaque phase du réseau d'alimentation.
- Mesure du THD (U et I) avant et après filtrage (self série).
- Mesure du niveau de pureté harmonique sur chaque phase en tension.

Moteur à courant continu piloté par variateur de vitesse multiquadrants (engins de levage, presses, tours, laminoirs, machines à papier, etc.) :

- Mesure du courant continu nominal moteur.
- Contrôle du sens du courant dans le cas d'entraînement multiquadrants (générateur ou moteur).
- Possibilité d'utiliser en mode *peak* en fonction du sens du courant et de la tension.
- Réglage automatique de l'offset (I DC zéro) par appui prolongé sur la fonction Hold ;
- Contrôle en amont sur le réseau du niveau de pollution harmonique en tension et en courant.

Alimentations continues :

- Mesure directe du taux d'ondulation en mode DC.
- Mesure des courants harmoniques de rang pairs en amont du redresseur.
- Enregistrement (*Record*) des minima et maxima du taux d'ondulation en fonction du courant consommé par la charge.
- Mesure du sens et de la valeur crête du courant.
- Mesure de la composante alternative (AC) uniquement par préprogrammation : mesure du taux d'ondulation en tension

□ Matériels disponibles pour la mesure

Différents constructeurs se partagent le marché, tel que Fluke (*figure 9.31*) et Chauvin Arnoux…

Figure 9.31 – Équipement Fluke F43B.

Les caractéristiques électriques essentielles sont les suivantes :

- Courant (TRMS) : étendue (exemple : jusqu'à 1 500 A), précision typique, facteur de crête, réponse en fréquence, surcharge admissible.
- Tension (TRMS) : étendue (exemple : jusqu'à 600 V), précision typique, facteur de crête, réponse en fréquence, surcharge admissible, impédance.
- Fréquence : étendue 0,5 à 10 kHz, seuil de déclenchement 1 A ou 1 V, précision
- Sortie analogique : étendue 1 mV/A ou 10 mV/A, précision typique, surcharge permanente admissible.
- Type d'alimentation : pile.

Diagnostic harmonique :

- Taux de distorsion harmonique totale THD : étendue : 0,5 à 100 %, seuil de déclenchement, précision de base, réponse en fréquence et nombre maximal du rang pris en compte (exemple 50e rang).
- Facteur de distorsion DF : idem THD.
- Facteur de crête : idem THD.
- Facteur *K*.
- Facteur CBEMA.

Fonctions supplémentaires :

- *Peak* : valeur crête positive ou négative
- *Smooth* : filtrage de la mesure en cas d'harmoniques fluctuants.
- *Hold* : mémorisation des valeurs mini/maxi/moyennes.
- Sortie sur RS232 liaison optique, logiciel sous Windows pour un traitement numérique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Afficheur :

– Numérique ou graphique.
– Trois niveaux de lecture : valeurs, courbes, relevé ou spectre harmonique.
– Affichages simultanés de plusieurs grandeurs.
– Rétro-éclairage.

Ergonomie :

– Diamètre d'enserrage.
– Masse
– Dimensions.
– Sécurité : normes CEI 61010 Cat. III-2 (double isolation, degré de pollution 2, catégorie d'installation III, tension de service 600 V RMS), protections dues aux chocs, chutes… : CEI 68.2, CEM : CEI 801-2 à 5, indice de protection IP40 (selon CEI 529).

Démarche proposée afin de mener une étude d'analyse harmonique sur un réseau électrique :
Outils d'analyse préconisés :

– Pinces harmoniques F23 ou F27.
– Analyseurs monophasés C.A 8220/C.A 8230.

On définit :
Niveaux de compatibilité CEI :

– pour les réseaux publics BT (CEI 61000-2-2) : THD tension = 8 %
– pour les installations industrielles et suivant la classe d'appareils (CEI 61000-2-4) :
  • classe 1 (appareils sensibles) : THD tension = 5 %
  • classe 2 (appareils moyennement sensibles) : THD tension = 8 %
  • classe 3 (appareils de fortes puissances) : THD tension = 10 %

Légende :
Degré d'intervention de 1er niveau : ce niveau d'intervention consiste simplement à qualifier une installation électrique en terme de niveau de pollution harmonique.
Les outils de mesure préconisés sont les pinces harmoniques de type F21 et F25.
Critère retenu : THD tension.
Normes de référence.

Remarque

En général, le taux de distorsion harmonique global en tension est mesuré au secondaire du transformateur de l'installation. Celui-ci ne doit pas dépasser la valeur de 6 %. Au-delà de cette valeur, des dysfonctionnements peuvent apparaître sur les équipements raccordés sur ce réseau.

Degré d'intervention de 2e niveau : ce niveau d'intervention consiste à quantifier une installation électrique en terme de niveau de pollution harmonique en localisant et en évaluant les rangs harmoniques présents sur les circuits comportant des charges non linéaires.
Les outils de mesure préconisés sont les pinces harmoniques de type F23 et F27.
Critère retenu : THD courants pour les rangs harmoniques présents au niveau de l'installation.
Normes de référence.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Remarque

Identifier dans un premier temps les circuits pollués du réseau par la mesure des courants harmoniques et ceci dans chaque circuit du réseau. Comparer ensuite la valeur des courants harmoniques relevés avec les valeurs préconisées par la norme. Identifier ainsi les charges pollueuses de l'installation.

Degré d'intervention de 3e niveau : ce niveau d'intervention permet de préconiser la ou les solutions à mettre en œuvre pour la résolution des perturbations harmoniques sur une installation électrique. Cette démarche s'adresse à des bureaux de calculs spécialisés dans ce domaine qui pratiqueront des mesurages appelés au fil de l'eau permettant d'enregistrer sur une période choisie les paramètres cités précédemment.
Les outils de mesure préconisés afin de valider le filtre appliqué in situ sont les analyseurs de réseaux monophasés par exemple C.A 8230.
Nos conseils : le degré d'intervention de 3e niveau correspond au choix et au dimensionnement du filtre anti-harmonique.
Le choix du type de filtre dépendra des contraintes économiques de l'exploitant ainsi que de la définition des limites acceptables sur la distorsion de la tension du réseau considéré.
Nous présentons ici les wattmètres et analyseurs de puissance qui ont pour objectif de mesurer la puissance active, réactive, apparente et le facteur de puissance en monophasé et triphasé équilibré.
Pour cela, il fera la mesure du courant (RMS) sans ouverture du circuit (pince ampèremétrique) et de la tension (RMS) ainsi que la mesure de la fréquence (*figure 9.32*).
Certains ont deux calibres en courant et tension mais en général tous les appareils sont autocalibrés et l'appareil reconnaît la pince ampèremétrique automatiquement.
Une fonction PEAK permet d'étudier les pointes de charge et de puissance.
Des mesures comparatives sont également possibles grâce à la fonction MEM (mémorisation) et affichage de deux pages de valeurs.

Figure 9.32 – Équipement C.A 8220.

Les applications possibles sont :

1) Les lignes triphasées/transformateurs BT :
   - Mesures simultanées du courant et de la tension, du facteur de puissance et de la puissance active (jusqu'à 600 kW avec une pince 1 000 A pour certains).
   - La fonction MEM+PAGE permet de faire des mesures comparatives en amont et en aval pour mesurer les pertes en ligne.
2) Les groupes électrogènes :
   - Mesurer les courants et les puissances délivrés sur chaque phase.
   - Vérification de la fréquence, et de la tension fournie par le groupe.

   La touche page permet de visualiser la seconde page relative à la fréquence, à la puissance.
3) Les moteurs asynchrones triphasés :

   La fonction PEAK est très utile pour mesurer le courant de décrochage moteur, la chute de tension et les pointes de puissances.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

- Valeur maximale du courant efficace.
- Valeur maximale de la puissance active.
- Valeur maximale de la tension efficace.

4) Les armoires électriques et électromécaniques :

- Diagnostic électrique complet (A, W, VA, Var, FP, U, Hz) monophasé et triphasé du départ de l'armoire jusqu'aux éléments avals raccordés, moteurs, chauffage, éclairage (*figure 9.33*).
- La fonction « harmonique » permet de localiser et d'éliminer les pertes de courant et de puissance dus aux harmoniques de courant.

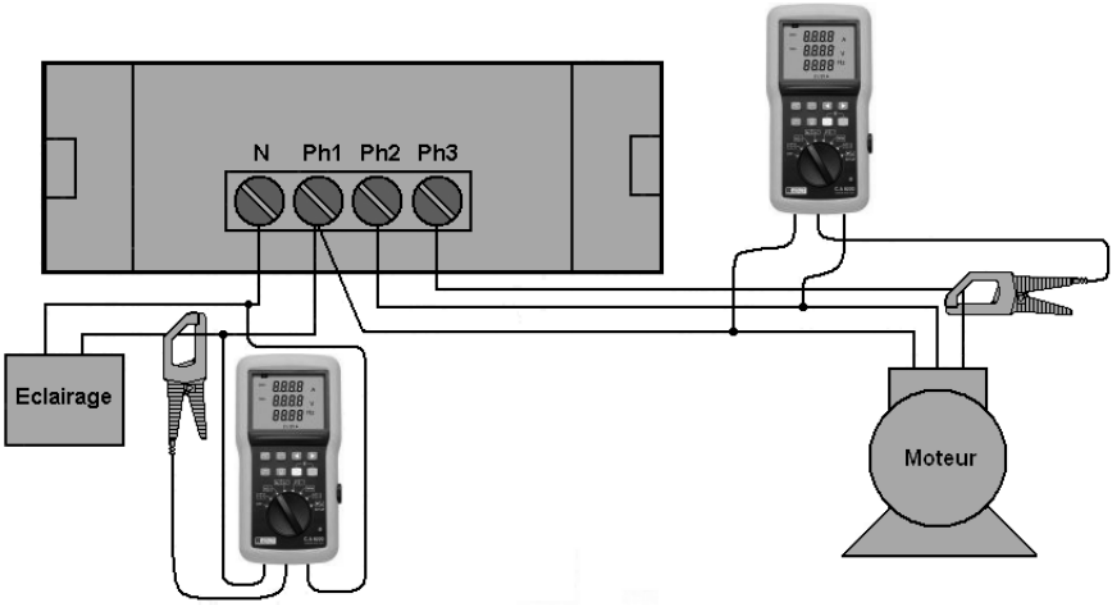


Figure 9.33 – Diagnostic sur installation.

On différencie les wattmètres monophasés (I, U, P, Q, S, FP, F) des analyseurs de puissances ou de réseaux qui intègrent les fonctions décrites précédemment et qui offrent en plus la mesure en TRMS équilibré ou déséquilibré 3 ou 4 fils, une analyse harmonique (I, U, P, S, Q) pour certain jusqu'au 50e rang. Gérés par logiciel via une liaison RS232, USB, ils peuvent déclencher des alarmes à partir de seuils préréglés mesurés et affichent plus de 40 paramètres.

On distingue surtout les wattmètres industriels type C.A 8334, des wattmètres portatifs PX 120 et Fluke 43 qui tendent à présent à devenir non plus un simple mesureur de puissance mais bel et bien un énergimètre couplé à la mesure de la qualité de la tension et du courant (gestion harmonique).

Wattmètres numériques haute sensibilité TRMS mono et triphasé équilibré : mesure de tension, courant, puissance active, réactive, apparente et facteur de puissance.

Transmissions numériques de données par interface infrarouge.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Sur réseaux DC et AC TRMS (*figure 9.34*).

Figure 9.34 – Analyseur de qualité de réseau triphasé Qualistar C.A 8334.

L'analyseur réseau monophasé C.A 8230 (*figures 9.35 à 9.38*) permet de réaliser de nombreuses mesures en toute facilité grâce à son didacticiel intégré (*figure 9.39*). L'affichage des valeurs des paramètres mesurés comme le THDi et THDv est disponible sur ce type d'équipement de mesure.

Figure 9.35 – Analyseur réseau C.A 8230 monophasé et triphasé équilibré.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

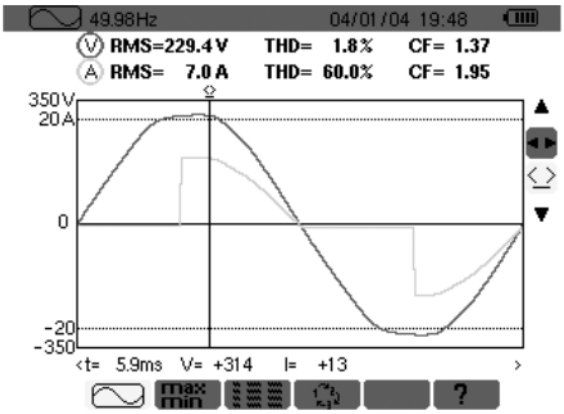


Figure 9.36 – Mesure de tension et de courant avec le C.A 8230.

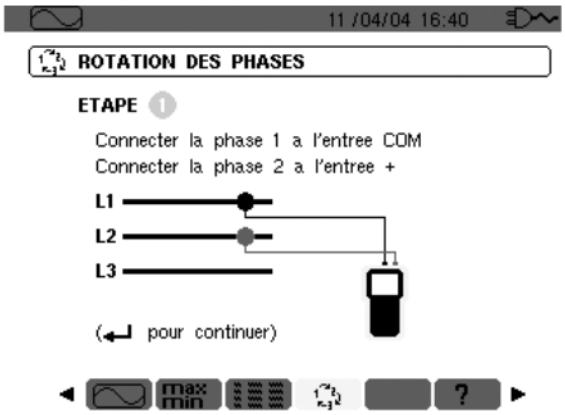


Figure 9.37 – Vérification de l'ordre des phases avec le C.A 8230 avec un didacticiel intégré.

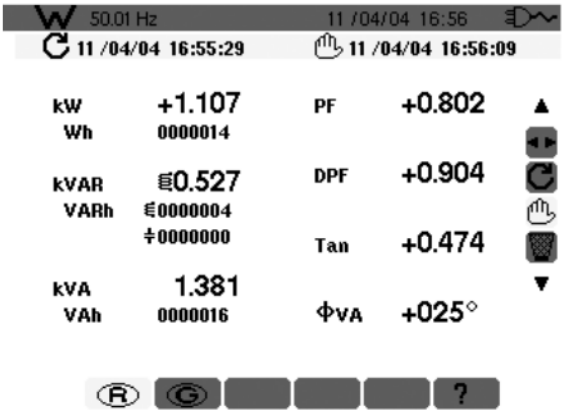


Figure 9.38 – Relevé des puissances et du facteur de puissance avec un C.A 8230.

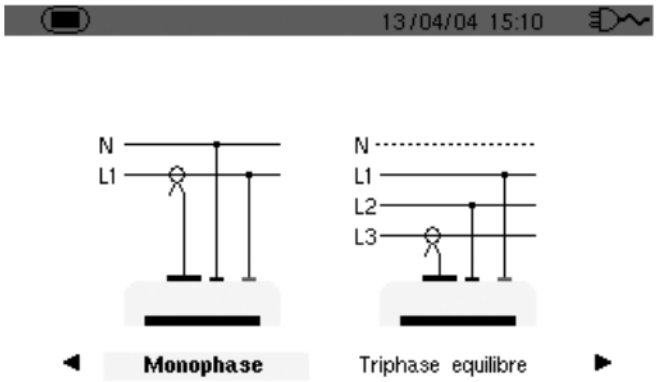


Figure 9.39 – Le didacticiel intégré du C.A 8230 permet même d'obtenir le schéma de câblage de cet appareil en monophasé ou triphasé équilibré.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Le choix d'un wattmètre ou d'un analyseur de réseau est suggéré à partir des *figures 9.40 et 9.41*.

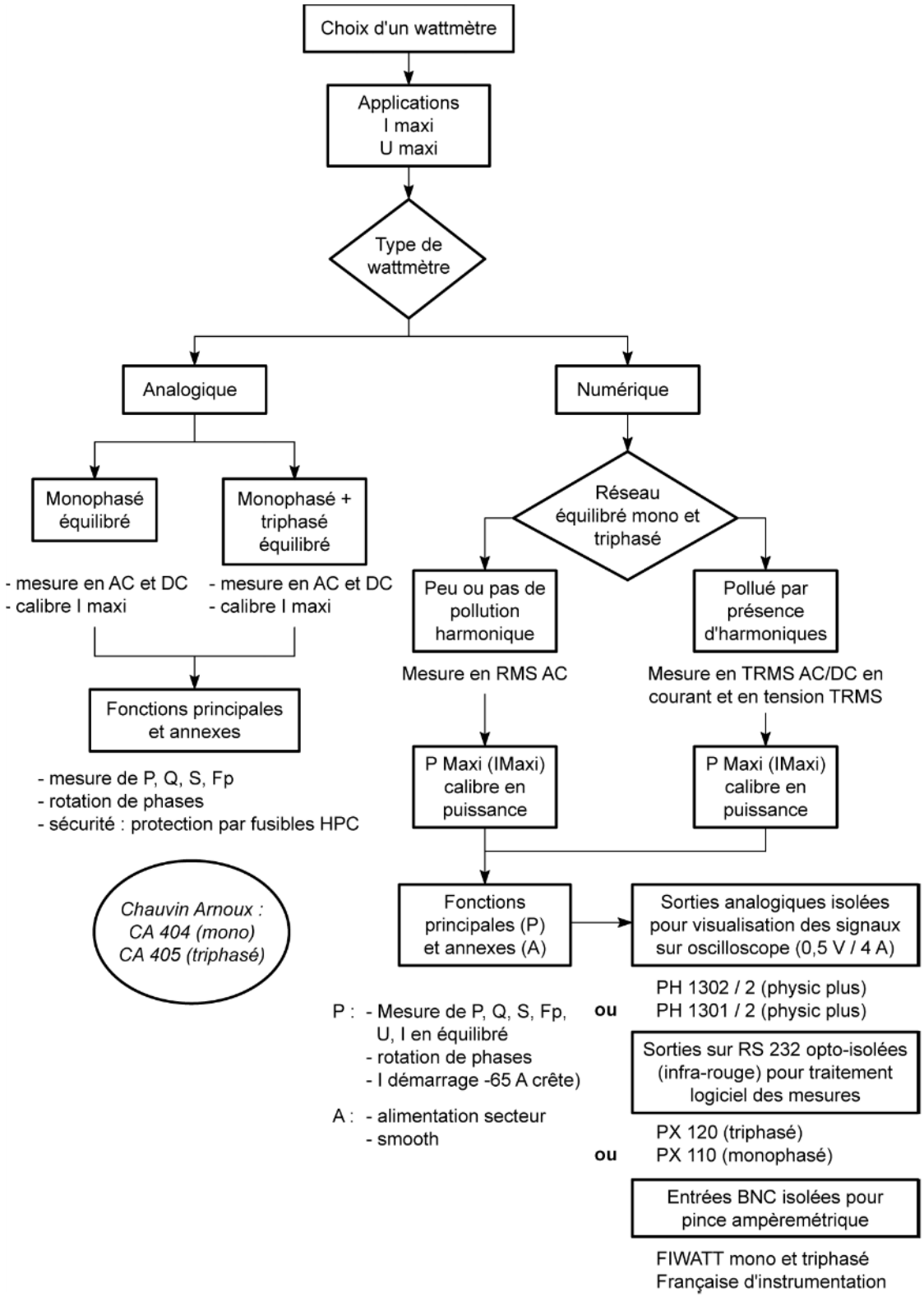


Figure 9.40 – Choix du type de wattmètre.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

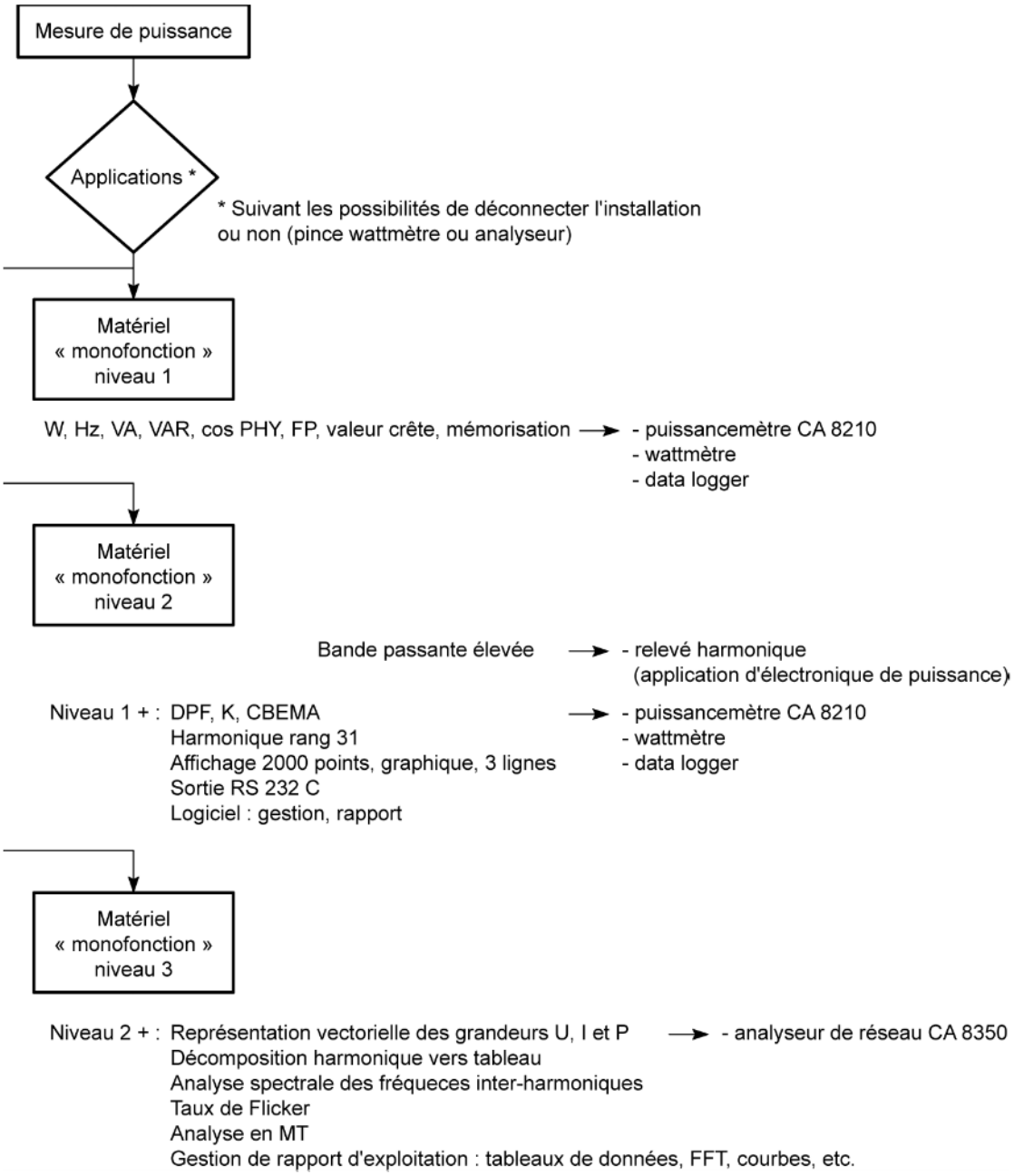


Figure 9.41 – Niveaux d'intervention.

Fiche technique : caractéristiques essentielles des wattmètres :

- Nature des réseaux : monophasé et triphasé 3 fils équilibré ou monophasé uniquement.
- Nombre de points sur l'afficheur : par exemple 3 lignes de 4 digits (14 mm).
- Bande passante : DC à 1 kHz minimum.
- Puissance active : étendue de mesure, résolution, précision de base en AC/DC.
- Puissance apparente et réactive : étendue de mesure, résolution, précision de base en AC.
- Facteur de puissance : gamme et résolution et cosφ.
- Relevé harmonique : THD, DF, facteur K… gestion rang par rang jusqu'au 50e.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Tension : étendue de mesure, résolution, précision de base en AC/DC, impédance d'entrée.
– Courant : étendue de mesure, résolution, précision de base en AC/DC.
– Courant de démarrage : gamme, résolution/précision de base en AC/DC.
– Liaison optique RS232 + logiciel.
– Alimentation : par exemple 6 piles 1,5 V LR6 ou batterie rechargeable pour le terrain prolongé.

Les normes qui régissent ce type d'appareil sont les suivantes : CEI 61010-1 cat. III 600 V, pollution 2 – CEI 61010-1 cat. III 1 000 V, 600 V cat. IV.

9.2 Mesures d'énergie

Ce chapitre présente uniquement les compteurs d'énergie, les pinces de puissance sont développées en relation avec les analyseurs de qualité de réseau dans le chapitre suivant.
Les compteurs électroniques actuels, interrogeables à distance, tentent de supplanter peu à peu les compteurs d'énergies électromécaniques.
Quelle que soit leur technologie, certains ont pour but de donner uniquement une valeur de l'énergie et la puissance active consommée, d'autres la puissance réactive, et pour les nouveaux, de réaliser des mesures d'ordres métrologiques (puissance active consommée par phase, réactive inductive, réactive capacitive, apparente) ainsi que qualimétriques (creux de tension, surtension, coupures…).
Les applications sont diverses et concernent les mesures de différents paramètres liés au comptage d'énergie mais aussi à la qualité de fourniture de l'énergie électrique (tension, courant, puissance active, réactive, apparente, facteur de puissance, THD, fréquence, énergies…) aux départs des TGBT des installations de chauffage, de climatisation, d'éclairage.
Ils intègrent aussi les applications tarifaires telles que les calculs des temps de fonctionnement dans chaque période tarifaire, le calcul des dépassements par rapport aux puissances souscrites et encore la ventilation des énergies dans les postes tarifaires.
Une sauvegarde régulière des données pour une analyse complète différée et/ou en temps réel avec un modem à connecter ou bien un compteur intégrant déjà celui-ci (Trimaran*) est effective. Les valeurs étant analysées par un logiciel dédié de télérelève.
Il réalise aussi la gestion par analyse de la consommation pour les abonnés du tarif vert : détection des concentrations de pointes de consommation « néfastes » à la facture finale.
On peut citer les différents types de compteur d'énergie existants :

– compteurs électromécaniques monophasés ou triphasés ;
– compteurs divisionnaires électroniques modulaires triphasés ou monophasés, double tarif, actif et réactif, etc. ;
– compteurs divisionnaires électroniques triphasés télérelevable par bus RS485 Modbus/Jbus™ ;
– analyseur d'énergie portable ;
– compteurs multiénergie, multifonctions (entièrement programmable), il reçoit deux applications tarifaires ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– centrales de mesures ou système équivalent en carte électronique RTUPLUS (Chauvin Arnoux).

Nous présentons les caractéristiques des compteurs d'énergie.

9.2.1 Compteurs d'énergie électromécaniques

■ Mesure de l'énergie active

Type abonné :

– monophasé : branchement direct 2 fils, 230 V 15 A, certain avec horlogerie double tarif, et relais récepteur 175 Hz intégré ;
– triphasé : branchement entre phases et neutre (4 fils) 3 × 230 V pour réseau 230/400 V en 10 A ou 20 A, certain avec horlogerie double tarif et relais récepteur 175 Hz intégré.

Type industriel triphasé :

– branchement 3 fils entre phases sur 2 TC (transformateur de courant 100/5 A) 3 × 230 V, 3 × 400 V ; certains modèles avec émetteur d'impulsions : 1 imp = 40 Wh en 3 × 400 V ;
– branchement 4 fils entre phases et neutre sur 3 TC (transformateur de courant 100/5 A) 3 × 230 V, 3 × 400 V, certains avec horlogerie double tarif 3 × 230 V et émetteur d'impulsions : 1 imp = 40 Wh.

■ Mesure de l'énergie réactive

Type industriel :

– branchement 3 fils entre phases sur 2 TC (transformateur de courant 100/5 A) 3 × 230 V, 3 × 400 V ;
– branchement 4 fils entre phases et neutre sur 3 TC (transformateur de courant 100/5 A) 3 × 230 V, 3 × 400 V.

9.2.2 Télécommandes centralisées

Les télécommandes centralisées permettent de commander depuis un point central jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de relais récepteurs qui permettent grâce au réseau de distribution de véhiculer des informations par superposition d'un signal de commande de 175 Hz sur le 50 Hz (système PULSADIS).

Relais à fonction générale : changement du tarif jour/nuit, changement de tarif des compteurs double tarifs (4 × 2 ordres : A, C, D, E), asservissement au changement de tarif des appareils électriques (ballon d'eau chaude, etc.).

Relais à fonction EJP/BT : pour les contrats EJP pour lequel l'année est divisée en heures normales et en heures de pointes mobiles réparties sur 22 jours : préavis, le relais annonce, 1/2 heure avant le passage en EJP, changement de tarif, il assure le basculement des postes tarifaires ; asservissement des circuits électriques à commander et changement de tarif se font simultanément (relais double).

Relais récepteur : une mémoire PROM permet de gérer l'éclairage public par l'envoi d'un signal de commande 175 Hz ou de gérer le tarif avec option EJP MT.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

9.2.3 Compteurs d'énergie électroniques modulaires

Caractéristiques techniques : précision de comptage (classe 1 ou 2), fréquence d'utilisation (45 à 65 Hz), lecture directe suivant le rapport du TC sélectionnable (5, 10, 15… 100… 1 000/5 A), le branchement (3 ou 4 fils).

Compteurs modulaires monophasés :

– Branchement direct de 15 à 90 A (max 25 mm^2), précision classe 2 selon CEI 1036, contrôle métrologique par Led en face avant.
– Affichage par cristaux liquides de 8 digits, période tarifaire en cours, bargraph de la consommation, intensité maximale atteinte, puissance souscrite, index d'énergie, intensité et puissance instantanées, récepteur d'ordre de télécommande centralisée intégré : 40 ordres de 175 Hz.

Compteurs modulaires triphasés :

– Version simple tarif : solution économique avec un compteur à entrées non isolées ou alors entrées isolées pour des installations où les secondaires des transformateurs sont en commun et/ou reliés à la terre.
– Version double tarif : une entrée permet de changer le tarif et de comptabiliser l'énergie sur l'un ou l'autre des totalisateurs. Deux sorties par impulsions en standard.
– Version énergie active et réactive : il affiche deux valeurs et dispose de deux sorties impulsions.

9.2.4 Compteurs d'énergie électroniques divisionnaires télérelevables par bus

Il en existe trois types :

– CDTe (*electronic*) (*figure 9.41 bis*) : deux versions 16 et 32 bits, mesure de 3I, 3V, 3U, 4P, 4Q, F, 4 cosφ, en instantané et en valeur moyenne (programmable de 1 à 99 min). Énergie active (classe 1) et réactive (classe 2) par phase et global. Entrée charge tarif pour P et Q. Une sortie avec impulsion (1 imp = 1 kWh) par transistor.
– CDTpr (*power recorder*) : fonctions identiques avec en plus :
  • Mémorisation au fil de l'eau des puissances moyennes appelées (8 jours d'enregistrement pour une période de 10 minutes).
  • Entrée synchronisation externe ou change tarif.

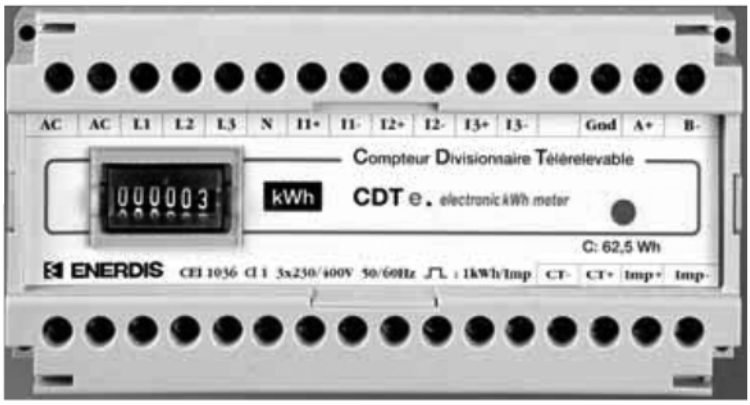


Figure 9.41 *bis* – CDTe (Enerdis/Chauvin Arnoux).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

- Enregistrement horodaté des dépassements en courant, puissance active, réactive et chute du facteur en global ou par phase (par seuil maximal programmable).
- Mémorisation de 12 compteurs des énergies actives et réactives sur 6 plages horaires programmables sur 24 heures.

– CDTpm (*power monitor*) : fonction identique au CDTpr avec en plus :
- Entrées isolées galvaniquement.
- 1 contact sec d'alarme programmable sur I, P, cosφ, par phase ou global.
- 4 entrées et 4 sorties TOR (alarme, délestage).
- 1 entrée comptage impulsionnelle (électricité, gaz, eau…)

Caractéristiques techniques communes :

– Entrées courant de base 5 A courant max 6 A.
– Rapport de TC réglable par micro-switch de 5 à 800/5 ou via les logiciels de configuration de 5 à 9995/5 A.
– Entrée tension 3 ou 4 fils, montage 2 ponts (2TC) ou 3 ponts (3TC).
– Plage d'utilisation de 57,7 à 500 V.
– Rapport de TP programmable via les logiciels de configuration de 0,1 à 999,9 par pas de 0,1.
– Communication numérique : support physique selon EIA 485 vitesse 300 à 19 200 bauds parité : paire ou sans source auxiliaire : 230 V AC.
– Encombrement 70 (h) × 150 (L) × 112 (P) mm.

9.2.5 Acquisition et gestion des impulsions de compteurs (électricité, eau, gaz…) TOPTEM

But : comptage d'énergie à partir d'une impulsion d'entrée externe isolée par optocoupleur. Reconstitution des courbes de charge, suivi des postes tarifaires par 4 entrées TOR, action de commande par 4 sorties TOR (2 A/250 V), surveillance par une entrée à relais/alarme.

9.2.6 Analyseur d'énergie portable (par exemple Ulysse)

But : permet d'analyser en autonomie le fonctionnement du réseau électrique sur différents points de l'installation. Fonction identique au CDTpr avec logiciel de supervision Winthor, convertisseur RS485/232 : CTA cordons de raccordement.

9.2.7 Compteur électronique triphasé multifonction (par exemple Trimaran 2)

Il est le compteur le plus complet de tous (multifonction), car entièrement programmable ; ses fonctions vont dépendre des postes tarifaires chargés à partir d'un PC. Voici quelques exemples de fonctions imposées par le distributeur français EDF.

■ Fonctions métrologiques

– Ventilation des énergies dans différents postes tarifaires.
– Calcul des puissances et des énergies de dépassement par rapport aux puissances souscrites.
– Calcul des puissances moyennes (intervalle de 10 min).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Calcul des temps de fonctionnement dans chaque période tarifaire.
– Calcul des pertes par effet joule, fer, lignes.
– Mise à disposition des données sur l'afficheur.
– Affectation des contacts de sorties clients.

■ Fonctions qualimétriques

– Calcul des types de défauts (creux de tension, surtension, coupures…) en fonction de leur amplitude et des seuils contractuels programmés par le distributeur d'énergie.
– Mémorisation des caractéristiques des défauts (date de fin, durée, amplitude, type).
– Calcul et mémorisation des variations lentes.

■ Fonction de base hors applications tarifaires

– Énergies consommées par phase.
– Énergie réactive inductive et capacitive triphasée.
– Travail fourni par la puissance apparente triphasée.
– Amplitudes et durée et dates d'apparition des défauts de tension par phase.
– Durée et dates des événements des défauts de tension triphasés.
– Valeurs cycliques de tensions composées efficaces (pour contrôle des variations lentes de tension).

■ Fonction dialogue

Grâce à un protocole de communication spécial (Trimaran+), ce type de compteur permet l'échange de données entre systèmes communicants indépendamment des fonctions remplies par le système de communication.

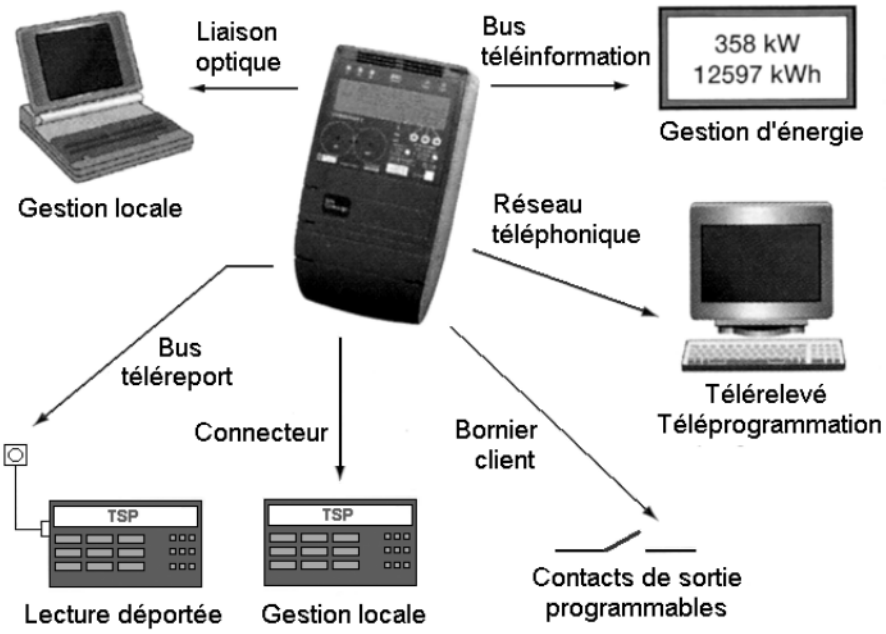


Figure 9.42 – Aptitude à la communication des compteurs d'énergie actuels.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Interfaces de communication :

– Liaison optique : elle autorise la gestion locale du compteur par PC : configuration du comptage, chargement des applications tarifaires, relève des courbes de charges et des tableaux de données qualimétriques.
– Télérelève et téléprogrammation (*figure 9.42*) : le compteur intègre un modem avec un protocole sécurisé permettant au distributeur de programmer et relever

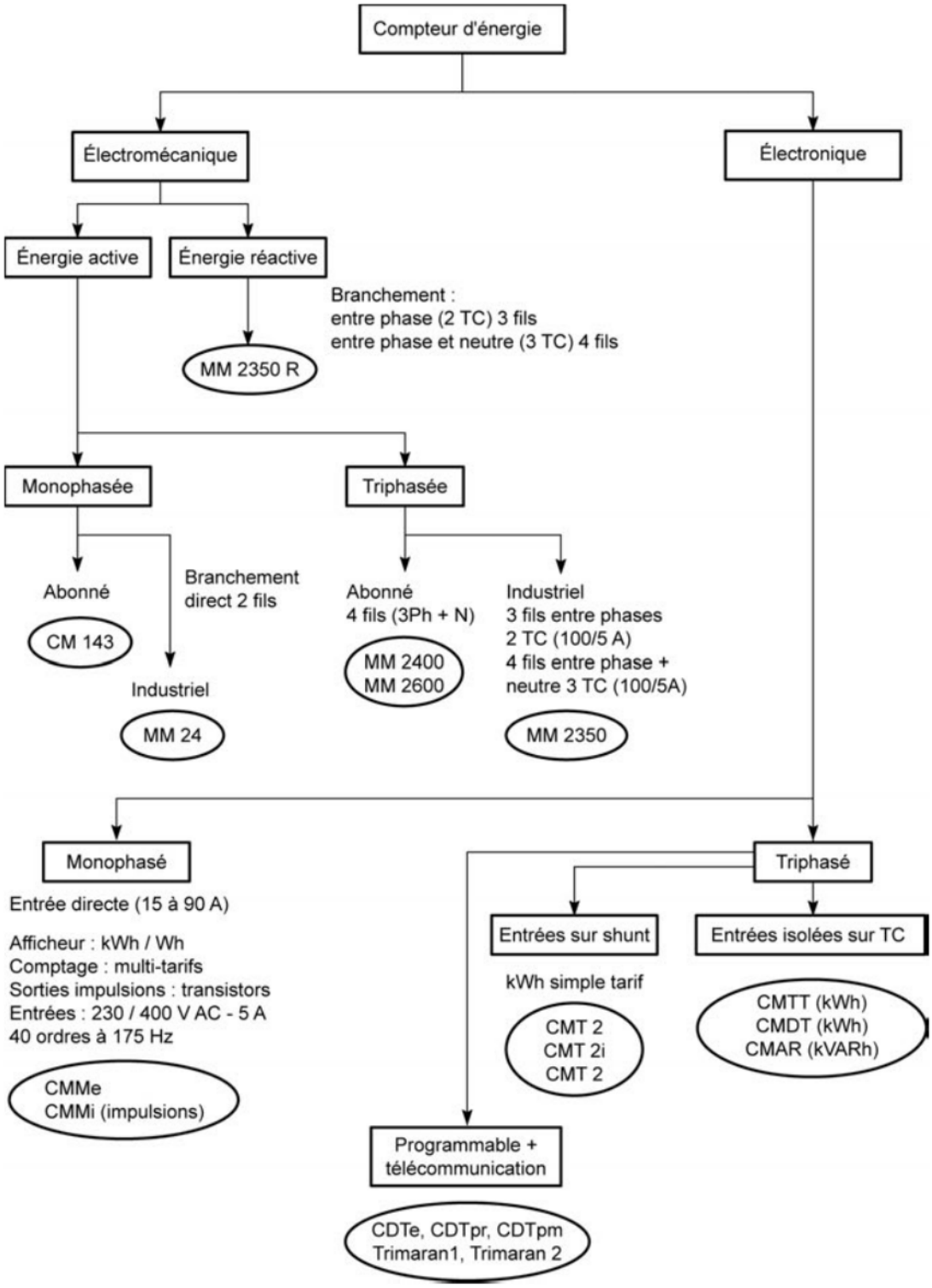


Figure 9.43 – Aide au choix d'un compteur d'énergie.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

à distance les données ainsi qu'au client de pouvoir effectuer des télérelevés de facturation mémorisées par le compteur.

– Téléport : cette liaison permet à un terminal de saisie portable de communiquer avec le compteur à des fins de relève des index et de programmation. La logique de transmission est celle d'un autre protocole spécialisé (Euridis+), le connecteur se situe en face avant.
– Téléinformation du client : la sortie « téléinformation » permet le raccordement d'un gestionnaire d'énergie pour donner au client des informations façon cyclique : période tarifaire en cours, index de consommations, qualité de fourniture, etc.

Fonction sauvegarde

La sauvegarde des paramètres contractuels et des données du comptage est réalisée à intervalle régulier (imposé par l'application tarifaire).
La sauvegarde en cas de coupure de l'alimentation secteur est automatique et placée en mémoire imperdable. Une pile au lithium assure la sauvegarde de l'horodateur.

Remarque

Le logiciel TRIPEC (PC + logiciel TRIPEC + modem [MDT 24] + simulateur de réseau téléphonique [C.A 9031]) permet d'obtenir les fonctions identiques au Trimaran 2 mais avec un compteur type Trimaran 1 en tarif vert.

Les deux systèmes sont agréés EDF.

Fiche technique

Types de réseau (monophasé, triphasé 3 ou 4 fils).
Classe de précision (énergie active : 0,5 S ou 0,2 S, énergie réactive : 2).
Quadrants (2 ou 4).
Période d'intégration : 1 à 60 mm par pas de 1 minute.
Mesures : tension, courant, courant de démarrage, fréquence nominale.
Alimentation : auto-alimentation ou par alimentation extérieure.
Contacts de sorties : à relais mono ou bistables, optocoupleurs, à impulsions en énergie active et réactive.
Entrées : entrées courant (courant max 6 A par exemple) et tension (440 V maxi).
Téléreport : bus Euridis 500 m 100 compteurs maximum.
Modem : agrément ART, RNIS, radiofréquence, GSM.
Température : de stockage et de fonctionnement.
Autres : masse, dimensions, indice de protection.

Normes

– Relative à la précision sur l'énergie active : CEI 1036 classe 2.
– Relative aux marquages CE : CEI 1000 2-4/3-4-5-6-8-11.
– Relative aux conditions d'utilisations :
  • Essais mécaniques : CEI 68-2-6.
  • Essais électriques : CEI 669-1 et 669-2.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

9.3 Mesures d'énergie et qualimétrie

9.3.1 Centrales de mesures (*figure 9.44*)

Il s'agit d'obtenir par mesures l'ensemble des paramètres d'un réseau en vue de gérer son optimisation, son exploitation (qualité des ondes, maintenance…) à distance.

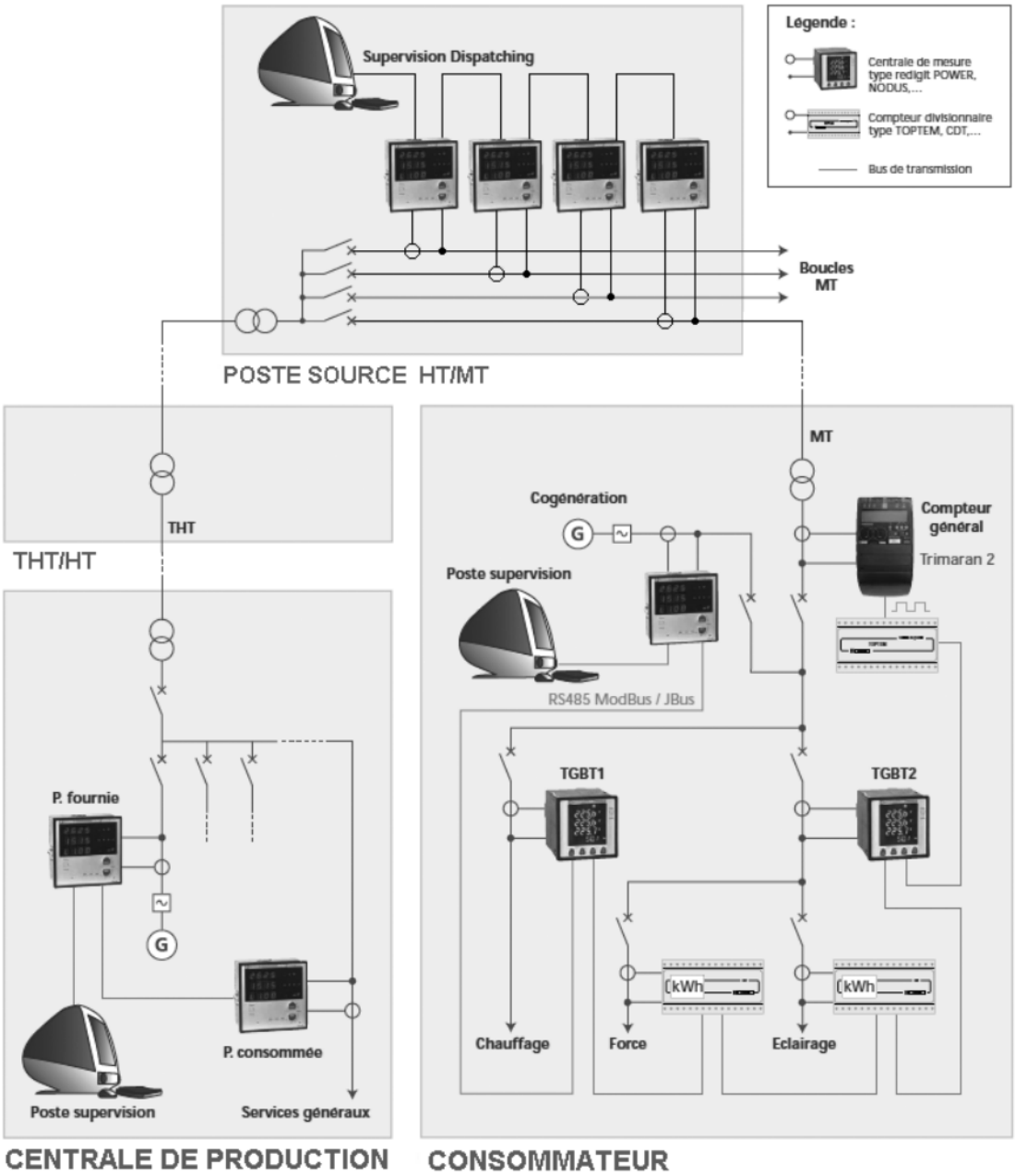


Figure 9.44 – Exemples d'utilisation d'une centrale de mesure.

■ Applications possibles

– Mesure de niveaux de tension dans les tableaux de distribution électrique, armoires électromécaniques…
– Mesures de différents paramètres (tension, courant, puissance active, réactive, apparente, facteur de puissance, THD, fréquence, énergies…) électriques aux départs des TGBT des installations de chauffage, de climatisation, d'éclairage.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Gestion de la maintenance à distance via les postes de supervision.
– Gestion des coûts des installations par édition d'une facture d'électricité via les paramètres de contrat tarifaire de puissance souscrite intégrés.
– Simulation tarifaire pour éviter toute surprise.
– Analyse harmonique de réseaux : THD, forme d'ondes, gestion du flicker…

■ Finalités de la gestion d'énergie réalisée par une centrale de mesure

– Assurer la sécurité des biens et des personnes.
– Exploiter et maintenir.
– Assurer la disponibilité du réseau.
– Assurer la qualité de l'énergie du réseau.
– Optimiser les coûts de l'énergie.

■ Présentation des fonctions d'une centrale de mesure

□ Afficher

Valeurs des paramètres réseau : tensions composées, tensions simples sur les trois phases, courant par phase, courant dans le neutre, puissance active par phase et globale, puissance réactive par phase et globale, puissance apparente par phase et globale, fréquence, facteur de puissance par phase et global, taux de distorsion harmonique par phase du courant et/ou de la tension, énergies actives, réactives, apparentes consommées et/ou fournies.
Mémorisation des valeurs crêtes, des seuils d'alarme, etc., de la puissance souscrite, etc.

□ Adapter/convertir

Avec ses nombreuses sorties la centrale devient :

– un compteur d'énergie,
– un capteur numérique par le biais de la liaison série RS485 permettant de disposer et d'exploiter des informations à distance.

Seuils programmés permettant aux sorties à relais d'alarme d'opérer pour une surveillance automatique efficace.

□ Renseigner

Le processeur, la mémoire et l'horloge via le logiciel de supervision permettent de rédiger un rapport d'exploitation avec tableaux, graphiques, courbes en temps réel avec horodatage des événements, détection de défaut de tension (creux, surtension), de courant dans le neutre, taux de distorsion harmonique anormal…
Elle s'adapte au réseau BT/MT/HT ou BTA/BTB/HTA/HTB :

– Cogénération : puissance fournie par l'alternateur.
– Dispatching de distribution MT ou HTA pour la télésurveillance des boucles.
– Les tableaux de contrôle-commande des moteurs.
– Les départs MT/BT des installations dans la grande distribution…
– Sur les gros sites commerciaux ou industriels, à des fins de supervision et de comptage divisionnaire BT.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Chez les consommateurs d'énergie, pour une analyse de la consommation et la gestion de délestage.

■ **Avantages des outils de supervision associés aux centrales de mesure :**

□ **Exploitations : deux solutions possibles**

– Solution constructeur avec un logiciel de télérelève et d'analyse dédié. À ce jour, Enerdis propose un logiciel E.online de gestion des énergies et de supervision des réseaux électriques (wwww.enerdis.fr). Celui-ci conjugue à la fois gestion multi-énergie, réduction des coûts énergétiques, simplification d'exploitation et maîtrise des réseaux électriques. Il s'intègre dans le contexte de l'efficacité énergétique.
– Intégration dans une supervision générale : centrales connectées à des automates via une liaison série RS485 Modbus/Jbus. Automate connecté au central de supervision par un réseau rapide de communication (Ethernet, WordFip, profibus…) utilisant la fibre optique. Dans ce système les automates programmables assurent la fonction d'organe de contrôle-commande : surveiller et commander les organes de coupure et de protections des boucles MT.

□ **Sur le poste**

L'opérateur peut :

– sur les schémas synoptiques obtenir et gérer l'état des disjoncteurs, la consommation en énergie électrique de chaque atelier, l'état du système de contrôle d'accès, la protection incendie, le génie climatique ;
– commander à distance les actions d'ouvertures de disjoncteurs, variateur d'éclairage, etc. ;
– obtenir les paramètres de l'installation pour contrôler la qualité de l'énergie du réseau ;
– obtenir par un télérelevé automatique des index des compteurs d'énergies, une facturation par unité de consommation.

□ **Particularités de cette gamme**

Plug and play : Socomec a développé une gamme de produit modulaire permettant à l'utilisateur d'acquérir le module principal DIRIS AP et de connecter ensuite des modules additionnels de son choix sans racheter le principal.
Les modules additionnels proposés sont :

– Module 1 : modules de mesure (± kWh, kVAh, ± kVARh) avec deux sorties impulsionnelles programmables.
– Module 2 : module 1 + modules harmoniques des courants I1, I2, I3, U12, U23, U31, THD U/I jusqu'au 15e rang.
– Module 3 : module de communication RS485 avec le protocole JBUS/MODBUS avec une vitesse de transmission de 38,4 bauds.
– Module 4 : module analogique : deux sorties analogiques 4-20 mA configurables.
– Modules 5 : module d'alarmes ou contrôle/commande : deux entrées comptage d'impulsions, deux sorties alarmes ou sortie de commande, la fonction alarme

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

peut être programmée sur des valeurs min ou max sur les paramètres suivants : 3I, 3U, In, ΣP, F, PF, THD I/U et options hystérésis.

Ce compteur d'énergie a la particularité d'être connectable directement sur les câbles sans dénuder et interrompre le circuit par un système de clip sur le câble lui-même en perforant l'isolant du câble.

La centrale de mesure trouve sa place à tous les étages (production, transport, distribution) :

– en HT : dans les centrales de production d'énergie électrique pour contrôler la puissance délivrée par un alternateur ;
– en MT : sur tous les dispatchings de distribution MT pour la télésurveillance des boucles, sur des tableaux de départs de commande de moteurs, sur des départs MT/BT des installations industrielles ou commerciales pour la qualimétrie ;
– en BT : pour la supervision et le comptage divisionnaire, analyse de la consommation et gestion des délestages en BT chez les utilisateurs.

Comment ? Il suffit de connecter les trois phases et le neutre au niveau tension, et capter les courants avec des transformateurs de courants de 1 A ou 5 A.

Le choix d'une centrale de supervision est proposé à la *figure 9.45*.

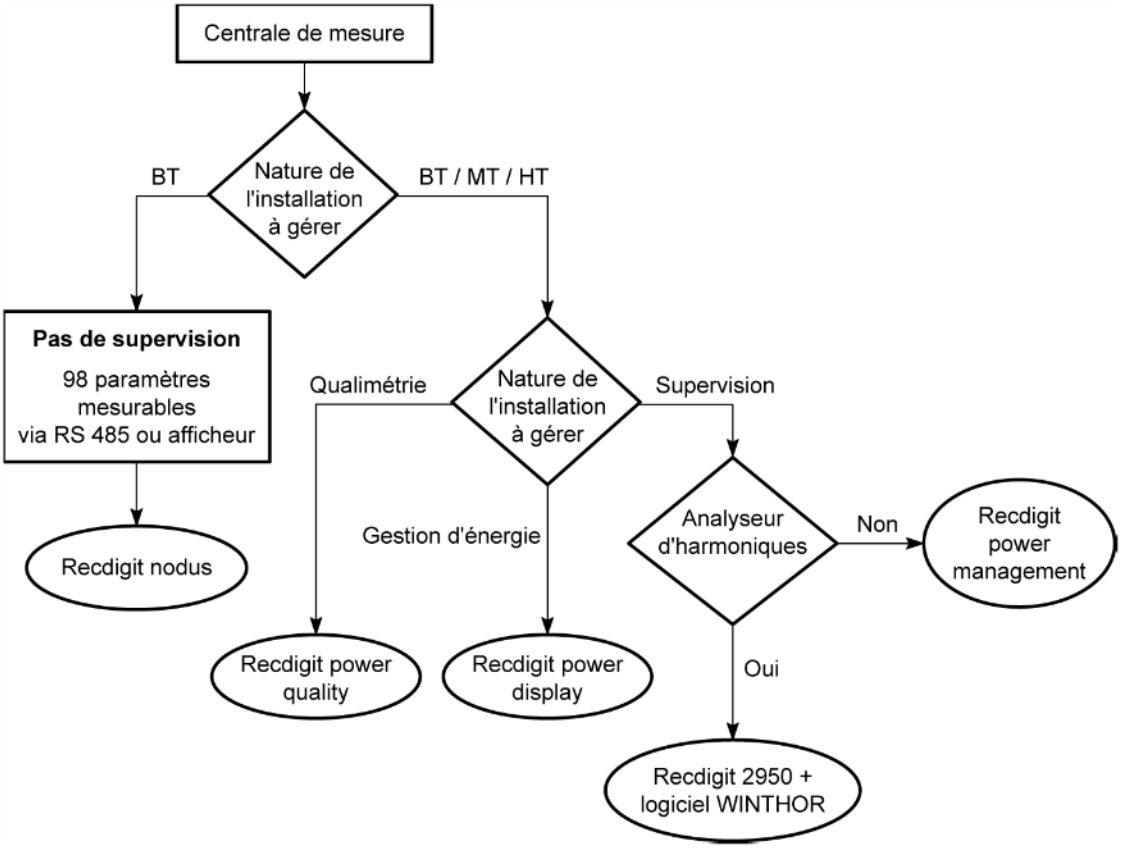


Figure 9.45 – Choix d'une centrale de mesure.

☐ Caractéristiques techniques essentielles

– Afficheur : LCD taille et couleur.
– Entrées courants : secondaire, primaire et consommation.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Entrées tensions : secondaire, rapport de TP, consommation.
– Fréquence d'utilisation.
– Type de réseau.
– Alimentation.
– Sortie : numérique, à alarmes, à impulsions, analogique.

□ **Caractéristiques métrologiques essentielles**

– V, U, I.
– P, Q, S.
– FP/fréquence.
– E active/E réactive, E apparente.
– Compteur horaire.
– THD U et THD I.
– Sortie analogique.

□ **Caractéristiques mécaniques**

– Raccordement : circuit courant, tension, relais…
– Masse, dimensions, fixation.

□ **Normes en vigueur**

– Relative à la précision sur l'énergie active : EM 61326-1 + EM 61010-1.
– Relative aux conditions d'utilisations des produits : CEI 61000-4-30 et EM 50160.

9.3.2 Analyseurs de qualité de réseaux

Ils regroupent trois grandes fonctions principales plus ou moins étendues suivant les modèles : un *analyseur d'énergie* (toutes les grandeurs électriques : U, V, I, P, S, Q, FP, V_{CC}, F, Q_{comp}, en valeurs maximales, minimales, moyennes), un *analyseur de perturbations* (microcoupures, variations lentes de tension, pic de tension, flicker, bruit haute fréquence, saut de fréquence, symétrie des tensions…), un *analyseur d'harmoniques* (au maximum jusqu'au 50e rang, THD global et rang par rang, déphasage de chaque harmonique…) bien évidemment la plupart des analyseurs ont des ports de communication pour la télérelève et la programmation des campagnes de mesures, d'autres ont des protocoles de suivi de valeurs et de rédaction de rapports en temps réel (représentation vectorielle ou temporelle, dépouillement et tri statistique…).

■ **Applications possibles** (*figure 9.46*)

– Surveillance des réseaux de distributions.
– Gestion des microcoupures pour des salles informatiques.
– Compensation d'une installation tertiaire de l'énergie réactive.
– Gestion de la qualité du réseau en différents points d'une installation dans le cas d'analyseur portable.
– Suivre les courbes de charges de transformateurs, campagne de mesures sur transformateurs de distribution publique sur poteaux, etc.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 9.46 – Mesure sur site avec le Qualistar C.A 8334.

Fonctions des analyseurs de réseau en monophasé et triphasé

- Programmation et relevé par micro-ordinateur.
- Visualisation par affichage alphanumérique en face avant.
- Analyse des résultats sur micro-ordinateur grâce à un logiciel adapté qui permet de visualiser dans l'ordre chronologique les perturbations de déterminer les valeurs maximales et leur durée.
- L'horodatage des événements permet de situer dans le temps le phénomène et d'en déduire les causes et les effets.

Exemples d'énergimètres et analyseurs de qualité de réseau

Les énergimètres portables monophasés Fluke F43B (voir *figure 9.31*), CA 8220 ou CA 8230 regroupent les fonctions de mesures d'oscilloscopies, de puissances, d'énergie, d'harmoniques (50e rang), des mesures conventionnelles courant, tension, fréquence, de captures de transitoires, de température comme des perturbations (variations lentes, flicker, saut de fréquence, etc.).

En triphasé équilibré ou non, chez Chauvin Arnoux, les Qualistars 8332 et 8334 (voir *figures 9.34, 9.46, 9.46 bis et ter*) sont des appareils portables faciles d'utilisation aux fonctionnalités similaires de leurs concurrents avec leur écran LCD couleur permettant trois types d'affichage (observation, diagnostic et surveillance), en mode vectoriel, temporel, fréquentiel ou listing.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

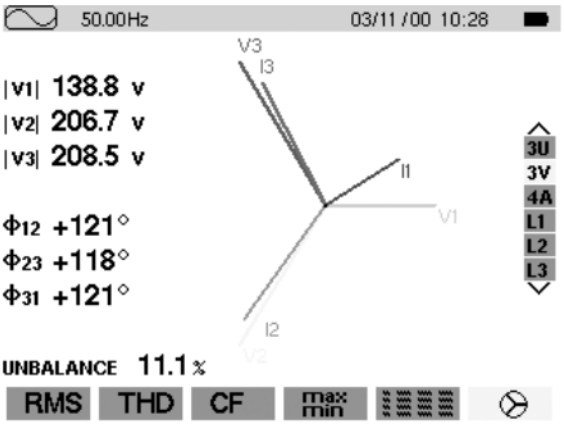


Figure 9.46 *bis* – Mesures des grandeurs vectorielles grâce au C.A 8334.

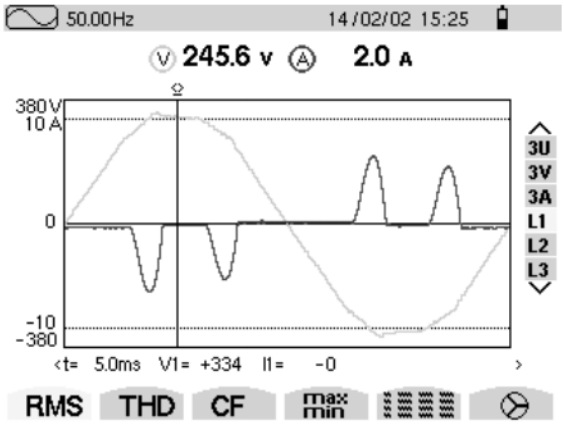


Figure 9.46 *ter* – Mesures en instantané de la tension simple et du courant d'entrée d'un variateur.

Les Fluke de la série 430 (*figure 9.47*) sont des outils portables aux fonctions similaires mais aux caractéristiques démultipliées comme la vitesse d'échantillonnage de 200 paramètres par seconde sur les trois phases, la possibilité d'enregistrer 400 paramètres à une résolution allant de 1 minute à 1 mois, une autonomie de 7 heures, un logiciel Powerlog.

Figure 9.47 – Énergimètre triphasé Fluke 435.

Les Fluke de la série 1735, 1740 et 1760 (de classe A, *figure 9.48*) sont des enregistreurs de qualité dédiés aux techniciens de maintenance chargés de réaliser des études énergétiques et de qualité de réseaux en effectuant des enregistrements sur

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

85 jours des paramètres conventionnels et de leurs harmoniques et d'éditer des rapports grâce au logiciel fourni.
Les logiciels de traitement QualistarView ou Dataviewer permettent de réaliser la configuration de l'appareil, de visualiser en temps réel et d'analyser qualitativement les paramètres de mesures pour l'édition de rapports (norme EN 50160).

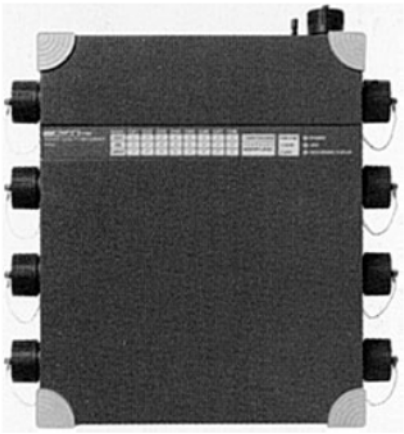


Figure 9.48 – Enregistreur de qualité d'énergie triphasé Fluke 1760.

Présentation des fonctionnalités d'un appareil

Le modèle C.A 8352 de Chauvin Arnoux assure les fonctions d'analyse développées de type :

- Paramètres d'analyse selon la norme EN 50160 : fréquence réseau, valeur de la tension, variation lente, rapide, coupures brèves et longues, creux et asymétrie, tensions inter-harmoniques surtensions passagères en 50 Hz.
- Analyse de la tension et du courant : valeurs efficaces vraies, moyenne, crête et facteur de crête.
- Analyse des puissances : puissance active totale, puissance active du fondamental, puissance réactive totale et puissance réactive du fondamental, puissance apparente et facteur de puissance, harmonique courant, tension, puissance active, réactive, puissance réactive de déformation.
- Décomposition jusqu'au 50e rang : mesure de tension Hn par rapport au fondamental et en absolu, mesure de courant Hn par rapport au fondamental et en absolu, déphasage de chaque harmonique, THD global et rang par rang (taux total de distorsion Hn), reconnaissance du sens de chaque rang harmonique, représentation FFT des tensions, courants, dépouillements statistiques.
- Analyse spectrale des fréquences inter-harmoniques : puissance active, réactive apparente, système à composante directe, inverse et homopolaire, déphasage, valeur absolue de la tension et du courant pour le spectre complet, tension et courant en représentation vectorielle.
- Analyse du taux de flicker : mesure du flicker selon la norme EN 60688, EN 61000-3 et CEI 868 : flicker de court et de long terme, valeur moyenne sur chaque phase, valeur maximale du flicker en instantané.
- Analyse du réseau HT : enregistrement d'événements « courts-circuits » (fonction perturbographe), symétrie de tension du réseau, mouvements oscillatoires de puissance et de fréquence.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Analyse des composantes symétriques et mesure de l'impédance du réseau (*figure 9.49*).

Figure 9.49 – Analyseur de réseaux, de perturbations, gestion d'énergie (C.A 8352).

La *figure 9.50* démontre en image les possibilités du C.A 8352.

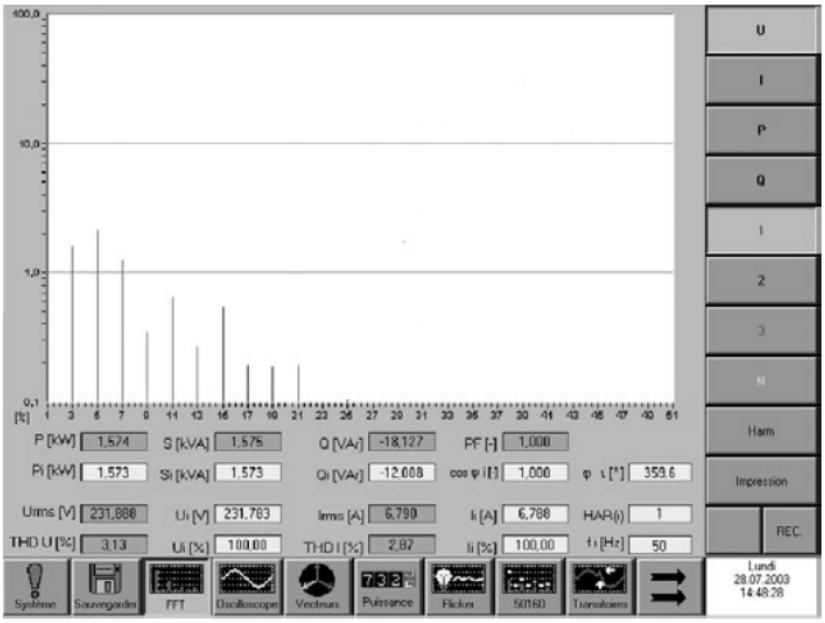


Figure 9.50 – Analyse harmonique complète 50e rang, U, I, P, Q.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Certains appareils sont capables sur une période de 8 jours d'enregistrer le courant sur chacune des phases, de calculer le courant dans le neutre et de déterminer le taux de déséquilibre pour deux départs maximum, leur période d'intégration est de 10 minutes pour les valeurs efficaces de courant et d'une minute pour les valeurs maximales.

Les enregistrements sont stockés en mémoire et transférables par logiciel sur PC.

Des modèles portables sont adaptés aux mesures sur poteaux sur des transformateurs de puissance apparente inférieure ou égale à 160 kVA.

La *figure 9.51* précise comment choisir un analyseur de réseau.

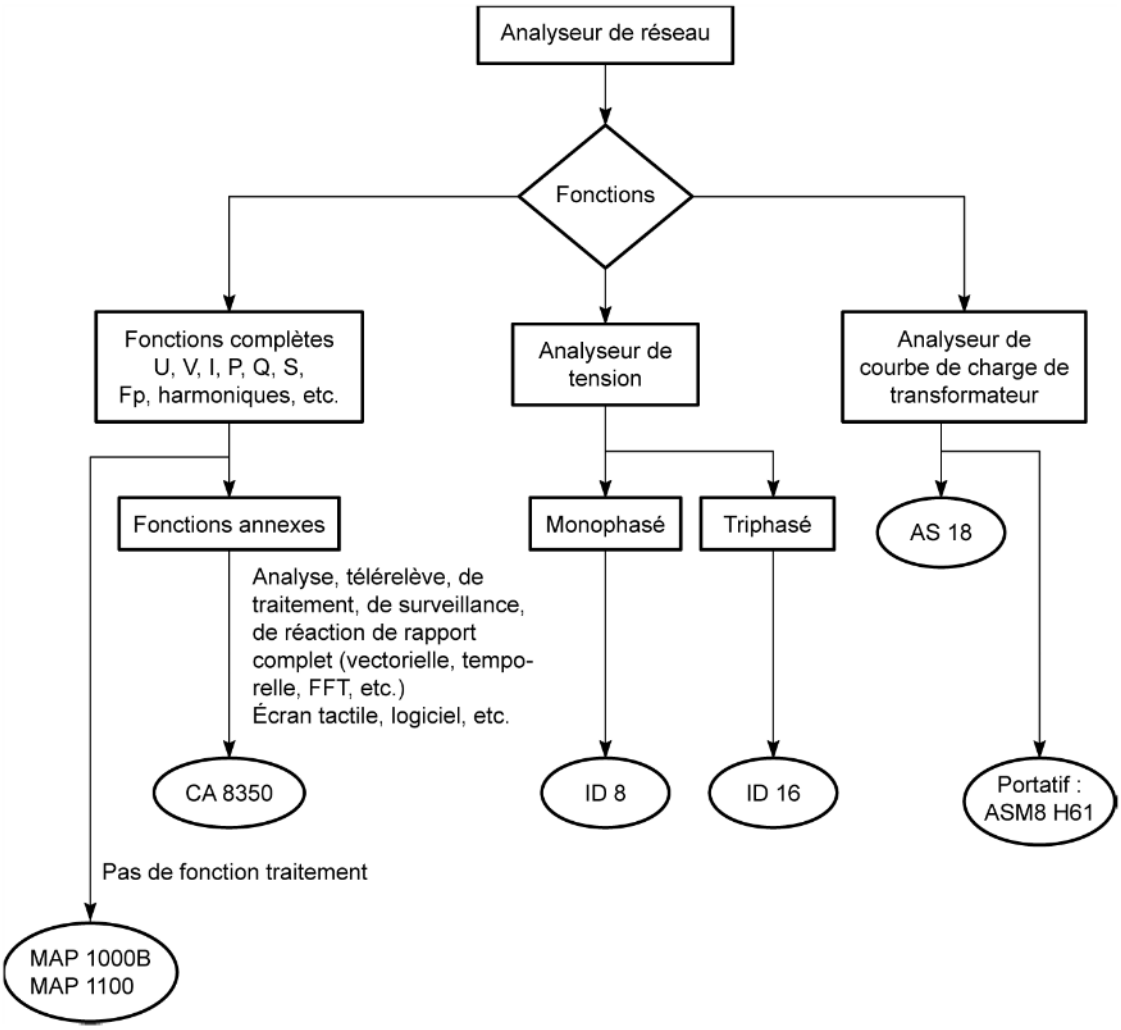


Figure 9.51 – Choix d'un analyseur de réseau.

■ Fiche technique d'un analyseur de réseau

- Fréquence réseau.
- Tension d'alimentation.
- Variations lentes et rapides de tension.
- Coupures de tensions.
- Creux et asymétries de tension
- Tensions harmoniques et tensions inter-harmoniques.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Surtensions passagères 50 Hz.
– Analyse des tensions et courants : valeur efficace vraie et moyenne, valeur crête et facteur de crête.
– Analyses des puissances : active totale et de la fondamentale, réactive totale et de la fondamentale, puissance apparente et facteur de puissance.
– Harmoniques : de tensions, courants, puissance active, réactive et réactive de déformation. Décomposition harmonique au 25e rang, THD global et rang par rang, mesures des tensions Hn par rapport à la fondamentale et en absolu, mesures des courants Hn par rapport à la fondamentale et en absolu, déphasage de chaque harmonique.
– Analyse spectrale des fréquences et inter-harmoniques : puissances active, réactive, et apparente, système à composante directe, inverse et homopolaire, déphasage, valeur absolue de tension et du courant pour tout le spectre, tension et courant en représentation vectorielle, analyse du taux de flicker de court et long terme, valeur moyenne, niveau max et min du flicker.
– Analyse du réseau haute tension : enregistrement des événements : court-circuit, symétrie des tensions du réseau, mouvements oscillatoires de puissance et de fréquence.

Caractéristiques des entrées :

– En tension : par exemple 4 canaux jusqu'à 2 kVpp, isolation 1,5 kVrms
– En courant : par exemple 4 canaux, domaine selon capteurs et précision.
– Entrées analogiques et numériques : en option ou non

Système central :

– Processeur principal : par exemple 128 Mo RAM.
– Mémoire de travail : par exemple 6 Go HDD 1,44 Mo.
– Affichage : par exemple LCD 19 cm couleur.
– Interface utilisateur : par exemple écran tactile.
– Interface machine : par exemple 2 ports USB pour connecter un clavier, une imprimante ou un modem…
– Taux d'échantillonnage : par exemple 6,4 kHz/voie (25 kHz en transitoire).
– Tension d'alimentation : par exemple 180… 265 V AC.

Caractéristiques générales :

– Température de service, de stockage, humidité relative.
– Dimensions et masse.

Normes associées : EN 50160, CEI 1000-2,1000-3, 1000-4, EN 60868, EN 61000-3, CEI 868, de sécurité électrique : CEI 61010-1 – 600 V – catégorie III – degré de pollution 2.

9.3.3 CEM

■ Définition

Le terme *compatibilité électromagnétique* (ou plus couramment CEM) recouvre des notions diverses.

Pour un équipement, parler de CEM signifie « ne pas perturber les équipements voisins », ce que l'on nomme émission électromagnétique ou EMI (*Electromagnetic Interference*), et « être construit pour supporter un certain niveau de perturbations électromagnétiques », que l'on nomme immunité ou susceptibilité ou encore durcissement, que les perturbations soient rayonnées ou conduites.

La CEM détermine donc l'adéquation d'un dispositif :

– à fonctionner correctement dans un environnement électromagnétique donné, ce qui détermine son degré de susceptibilité ;
– à ne pas générer lui-même des champs électromagnétiques, ce qui détermine son degré de perturbations.

■ Exemples de perturbations liées à la CEM

Voici quelques exemples de perturbations rencontrées de plus en plus souvent dans l'industrie et qui sont liées à la CEM :

– Dysfonctionnements aléatoires d'une machine commandée par un système électronique.
– Perturbations dans le déroulement d'un processus industriel commandé par un système séquentiel tel un ordinateur.
– Pannes fantômes sur des sites de production industrielle.
– Défauts erratiques des ensembles électroniques de mesure.
– Pannes aléatoires des automates programmables.
– Déclenchements intempestifs d'alarmes.

À des effets innombrables sont évidemment associées des causes innombrables. Les problèmes liés à la CEM peuvent être regroupés en deux grandes familles :

– Défauts liés à des signaux parasites véhiculés par les câbles d'alimentation ou par les connexions vers des sous-ensembles annexes (capteurs…) ou encore par les liaisons de masse (terre…). Ces défauts sont appelés *perturbations conduites.*
– Défauts liés à des émissions dans l'atmosphère de signaux électriques, émissions volontaires telles que celles des émetteurs de radiocommunications (TSF, TV, radiotéléphone, CB…) ou émissions parasites telles que celles créées par l'allumage des véhicules, les alimentations à découpage… Ces défauts sont appelés *perturbations rayonnées.*

Les perturbations rayonnées sont exclusivement dues au rayonnement électromagnétique d'une source qui émet des ondes dans l'atmosphère. C'est cette dernière source de problèmes que nous allons développer ci-après.

■ Rappels théoriques

□ Qu'est-ce que le rayonnement électromagnétique ?

Le rayonnement électromagnétique a été mis en évidence par les physiciens Hertz et Lenz. Une boussole disposée le long d'un conducteur parcouru par un courant électrique continu, voit son aiguille se placer parallèlement à celui-ci montrant ainsi qu'il existe un champ magnétique autour de ce conducteur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

L'onde électromagnétique correspondante est l'énergie rayonnée produite par l'oscillation d'une charge électrique. Elle est caractérisée par l'oscillation des champs électriques et magnétiques.

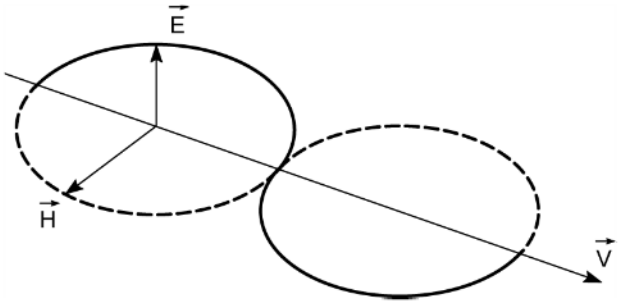
En schématisant, nous pouvons définir l'onde électromagnétique par les composantes suivantes :

– le champ électrique (**E**) qui est généré par la différence de potentiel existant entre deux conducteurs soumis à une tension électrique, ce champ est une fonction de la tension V ;
– le champ magnétique (**H**) comme le champ généré par un courant électrique parcourant un conducteur, ce champ est une fonction du courant i (*figure 9.52*).

Figure 9.52 – Représentation du champ magnétique **H** engendré par un courant *i* dans un conducteur.

Dans le cas d'une onde alternative sinusoïdale, le champ électrique **E** et le champ magnétique **H** sont sinusoïdaux et en phase (*figure 9.53*). Leurs directions sont perpendiculaires entre elles et perpendiculaires à la direction de la propagation définie par le vecteur vitesse **V**.

Figure 9.53 – Représentation des trois composantes d'une onde électromagnétique.



Les directions des trois vecteurs composants l'onde électromagnétique peuvent être retrouvées en appliquant la loi des trois doigts de la main gauche, ceux-ci sont placés perpendiculairement entre eux, dans cette position, il faut diriger l'index dans la direction du déplacement (vecteur **V**itesse) à ce moment le pouce indique la direction du vecteur champ électrique **E** et le médium la direction du vecteur champ magnétique **H**.

Cette onde est caractérisée par sa fréquence F en Hz ou sa longueur d'onde λ en m, ces deux grandeurs sont liées par l'équation suivante :

$$\lambda = C_0/F$$

avec C_0 la vitesse de la lumière en m/s (soit 300 000 km/s = 3×10^8 m/s).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Exemple : pour une onde à 300 MHz la longueur d'onde λ est de 1 m.
La longueur d'onde représente la distance parcourue par un point de l'onde lorsque celui-ci décrit une période entière. Pour l'exemple pris ci-dessus une période complète du signal représente une distance parcourue dans l'espace de 1 m.
Le spectre électromagnétique ou l'ensemble des ondes électromagnétiques se propage dans l'espace, il couvre un domaine très vaste allant du continu à plusieurs millions de gigahertz. Leurs propriétés varient en fonction de leurs fréquences.
Certaines ondes électromagnétiques sont détectables par l'œil humain, ce sont les ondes lumineuses. Les ondes radioélectriques ont des fréquences plus basses qui n'excitent pas l'œil mais qui peuvent être détectées à l'aide d'appareils radio.

☐ Polarisation de l'onde électromagnétique

À grande distance des sources de rayonnement, le champ électromagnétique est constitué par des vibrations transversales qui ont lieu dans un plan perpendiculaire à la direction de la propagation.
Une vibration est définie à son tour par l'ensemble de deux champs perpendiculaires entre eux, un champ électrique et un champ magnétique vibrant en phase à la même fréquence et ayant des amplitudes proportionnelles.
Une vibration peut donc être représentée au moyen de deux vecteurs perpendiculaires ; par convention, la direction de la polarisation d'une onde est la direction du vecteur représentant le champ électrique **E**.
En un point déterminé de l'espace, le vecteur champ électrique **E** peut conserver une direction fixe pendant une alternance de l'onde, on dit alors que la polarisation est rectiligne (onde plane).
Dans certains cas, il n'en est pas ainsi, et le vecteur **E** tourne d'un tour complet pendant une alternance, son extrémité décrit une ellipse ou un cercle et dans ce cas la polarisation est dite elliptique (onde circulaire).

☐ Propagation de l'onde électromagnétique

Le déplacement d'une onde électromagnétique s'effectue à la vitesse de la lumière suivant un trajet quasi optique ; cette caractéristique est valable pour de très grandes distances limitées uniquement par le rayon de courbure de la terre ; au delà, les ondes dont la fréquence est inférieure à 40 MHz se trouvent réfléchies par les différentes couches ionisées de l'atmosphère ; les ondes de fréquences supérieures à 40 MHz se trouvent absorbées par ces mêmes couches.
En règle générale, les ondes électromagnétiques sont réfléchies par les obstacles qu'elles rencontrent. Par exemple, elles sont réfléchies par le sol séparant le système d'émission du système de réception.
Si un système d'émission est installé à proximité du sol, le champ au voisinage du système récepteur sera la somme de deux composantes, à savoir, une onde directe plus une onde réfléchie par la surface du sol.
La valeur du coefficient de réflexion dépend de la polarisation de l'onde, et des caractéristiques du milieu rencontré. Ce dernier est caractérisé par trois paramètres :

– la *permissivité* ε_r qui caractérise une impédance pour les champs électriques ; dans l'air cette permissivité est ε_0 = 25 pF/m ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– la *perméabilité* μ_r qui caractérise une impédance pour les champs magnétiques ; dans l'air cette perméabilité est $\mu_0 = 4\,\pi \times 10^{-7}$ H/m ;
– la *conductibilité* σ_r du milieu rencontré exprimée en Ω ou en Ω/cm^2.

Il y a réflexion de l'onde électromagnétique dès que le milieu dans lequel celle-ci se propage est modifié par la nature d'un des trois paramètres caractérisant ce milieu, et dans ce cas l'angle de l'onde réfléchie est égal à l'angle incident.

Il y a absorption lorsque le nouveau milieu rencontré présente une impédance suffisamment élevée à la fréquence du champ pour dissiper l'onde sans la réfléchir : utilisation de matériau à base de poudre de ferrite. On peut dire aussi qu'il y a absorption lorsque les réflexions engendrées par ce nouveau milieu sont renvoyées dans des directions hors des limites du champ de mesure (cônes pyramidaux).

Dans l'exemple particulier de la *figure 9.54*, l'onde réfléchie illumine uniquement le point B ce qui a pour effet de modifier le champ électromagnétique de ce point (champ direct + champ réfléchi) par rapport au champ existant au point A, celui-ci se trouve plus près de l'émetteur et il a cependant moins de champ que le point B.

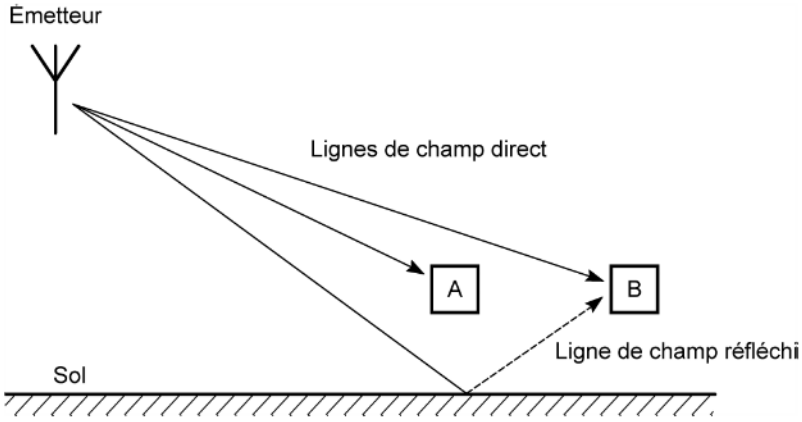


Figure 9.54 – Représentation des champs directs et réfléchis.

Cette démonstration est très empirique car en réalité il faut tenir compte de la rotation de phase du vecteur champ considéré qui a lieu à chaque réflexion qui peut, à la limite, annuler complètement le champ de l'onde incidente, cette manipulation montre cependant les difficultés qui apparaissent lorsqu'il faut obtenir un site donnant un champ uniforme en un lieu donné.

☐ Champ proche et champ lointain

Les radiations de proximité sont les champs rayonnés dans l'environnement immédiat de la source d'émission appelée encore radiateur, ils peuvent exister sous la forme de pur champ électrique **E** ou de pur champ magnétique **H**.

À partir du moment où l'énergie rayonnée s'éloigne, nous passons dans le domaine classique du champ éloigné où l'énergie se répartit en une composante magnétique plus une composante électrique.

Ce phénomène se passe graduellement et peut se mesurer en terme d'impédance d'onde.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Dans le cas d'un champ de proximité l'impédance est plus faible avec un champ magnétique et plus élevée avec un champ électrique, cela correspond à une adaptation d'impédance avec la source génératrice de champ.
Le champ proche est encore appelé *champ d'induction.*
Le champ lointain est encore appelé *champ de rayonnement* ou *onde formée.*
En champ lointain, l'intensité de champ E ou H est inversement proportionnelle à la distance séparant un émetteur d'un récepteur, et la densité de puissance en un point est inversement proportionnelle au carré de cette distance.

☐ Isotropie et anisotropie

Un radiateur de rayonnement électromagnétique est dit isotropique ou omni-directionnel lorsque celui-ci est placé au centre d'une sphère, les valeurs de mesures de l'intensité du champ relevées en tout point de la surface de cette sphère sont identiques.
Le diagramme de rayonnement d'une source de rayonnement électromagnétique est la représentation graphique de l'émissivité de celle-ci dans l'espace.
Le diagramme de rayonnement d'une source isotropique peut être représenté suivant les trois dimensions orthogonales par une sphère.
Par opposition à l'isotropie, une source anisotropique ou unidirectionnelle délivre un rayonnement qui est différent suivant les directions de mesure. Cette source privilégie une direction et son diagramme de rayonnement est représenté en général suivant deux axes.
Par extension les termes isotropie et anisotropie sont aussi utilisés pour définir le diagramme de sensibilité des capteurs de mesure d'intensité de champ.
Un capteur isotrope a la même sensibilité dans toutes les directions de mesure alors qu'un capteur anisotrope privilégie une direction particulière qui doit toujours être indiquée.

☐ Unités de mesure de champ électromagnétique

Le terme *intensité de champ* doit s'appliquer uniquement aux mesures effectuées dans le champ lointain.
On peut mesurer soit la composante électrique, soit la composante magnétique d'une onde électromagnétique.
Trois unités sont par convention utilisées pour définir l'intensité de champ d'une onde :

– la densité de puissance P en W/m^2,
– l'intensité du champ électrique E en V/m,
– l'intensité du champ magnétique H en A/m.

En champ lointain, la mesure de l'un quelconque de ces paramètres est suffisante pour qualifier le niveau de radiation.
Les deux autres valeurs peuvent être retrouvées par l'utilisation des formules de conversions suivantes :

$$E \text{ en V/m} = 61{,}4\ P$$

$$H \text{ en A/m} = 0{,}163\ P$$

avec P en mW/cm^2.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Un champ magnétique de 1 A/m correspond à 1,256 µT ou encore 0,796 A/m = 1 µT = 10 mG.

Pour les mesures effectuées en champ proche, le terme « intensité du champ électrique » ou « intensité de champ magnétique » doit être utilisé, selon que l'on mesure respectivement le champ électrique ou le champ magnétique résultant.

Dans cette région, il est difficile et complexe de prévoir la relation entre la distance par rapport à la source et l'intensité de champ électrique et magnétique, du fait que cette relation dépend de la configuration spécifique.

Dans la mesure où il n'est généralement pas possible de déterminer les relations de phase dans le temps et dans l'espace des différentes composantes d'un champ complexe, la densité du flux d'énergie dans ce champ est également indéterminée.

□ Pourquoi un système rayonne-t-il ou est-il susceptible ?

Une onde radioélectrique est produite par un courant circulant dans un conducteur ou par une tension alternative présente entre deux conducteurs.

Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est petite et plus les conducteurs se transformeront facilement en antenne d'émission.

Ainsi plus ces conducteurs se rapprocheront des dimensions idéales pour créer une antenne (fraction entière ou multiple de la longueur d'onde), plus ce conducteur rayonnera de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques.

De ce fait, si les circuits imprimés ou le câblage interne des appareillages électriques ne sont pas réalisés dans le but d'un rayonnement minimum, ceux-ci peuvent très rapidement se transformer en une source de rayonnement parasite très importante, surtout s'ils mettent en œuvre des fréquences élevées à large spectre (signaux de formes rectangulaires comme tous les signaux numériques).

De même, si une onde électromagnétique rencontre un conducteur de dimensions appropriées, celle-ci produit aux bornes de ce dernier une force électromotrice (f.e.m) alternative de même fréquence dont l'amplitude sera fonction de ses dimensions, de la distance séparant ces deux conducteurs et de l'énergie rayonnée.

C'est le principe de la transmission des signaux radioélectriques à partir d'une antenne d'émission vers une antenne de réception, dans ce cas c'est un phénomène volontaire.

C'est aussi malheureusement le cas de la génération d'ondes perturbatrices involontaires engendrées par tout système électrique, celles-ci viennent polluer l'atmosphère industrielle occasionnant tous les problèmes de compatibilité des appareils modernes.

■ Normes sur la compatibilité électromagnétique

Les normes sur les perturbations radioélectriques regroupées en compatibilité électromagnétique ont pour objet de définir les niveaux admissibles pour un équipement donné selon deux critères :

– Évaluation des perturbations produites sur un appareil dans les conditions d'utilisations. Norme générique immunité.
– Quantification du pouvoir perturbateur d'un appareil d'une manière indépendante de ses conditions réelles d'installation. Norme générique émission.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Par esprit de simplification, nous ne retiendrons que les dernières normes européennes mises en place pour décerner le label CE. Celui-ci est obligatoire depuis le 1er janvier 1996 pour la vente en Europe de tout matériel électrique, il est décerné aux matériels qui pourront faire la preuve de la tenue aux normes en vigueur sur la compatibilité électromagnétique.

☐ Degré de susceptibilité

Ces normes établissent une référence commune en vue de l'évaluation des performances de l'appareillage de mesure et de contrôle des processus industriels lorsqu'ils sont en présence de champs électromagnétiques créés par des émetteurs radio ou par tout autre système engendrant une énergie électromagnétique rayonnée par ondes entretenues.

Le principe de l'essai consiste à plonger l'appareillage dans un environnement électromagnétique homogène créé par un système d'émission d'ondes radioélectriques calibrées.

Procédures d'essais :

- Bande de fréquence : 80 MHz à 1 000 MHz.
- Modulation d'amplitude à 1 000 Hz avec une profondeur de 80 %.
- Site de test : la génération de champ peut se faire en chambre blindée (*strip line*, TEM, GTEM) ou en chambre anéchoïque.
- Principe de génération de champ électromagnétique : un amplificateur de puissance alimente une antenne d'émission. Le type d'antenne à utiliser est laissé libre, le niveau à l'entrée de l'ampli est réglé pour atteindre la valeur de champ désiré.
- Mesure du champ généré : utilisation d'un mesureur de champ de préférence isotropique placé à proximité immédiate pour le contrôle de l'homogénéité autour de l'appareillage sous test.
- Niveau de champ généré : trois classes sont spécifiées qui déterminent le degré d'immunité de l'appareil sous test :
  - classe ou niveau 1 : intensité du champ à générer 1 V/m ;
  - classe ou niveau 2 : intensité du champ à générer 3 V/m ;
  - classe ou niveau 3 : intensité du champ à générer 10 V/m ;
  - classe ou niveau X : catégorie ouverte englobant tous les environnements se caractérisant par des rayonnements électromagnétiques très intenses. Le niveau à générer est soumis à négociation entre l'utilisateur et le constructeur ou défini par le constructeur qui doit indiquer la valeur de la tenue de l'appareil.
- Sanctions des essais : la variété et la diversité des matériels et des systèmes à essayer rend difficile l'établissement de critères généraux pour l'évaluation des effets des rayonnements électromagnétiques sur ces matériels et systèmes.
- Les résultats d'essai peuvent être consignés sur la base des conditions de fonctionnement et des exigences fonctionnelles du matériel soumis à l'essai.

☐ Degré de perturbation

Deux classes d'appareils sont définies pour tenir compte du lieu d'utilisation de l'appareillage sous test :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Un équipement est dit de classe A s'il respecte les valeurs limites de la classe A et ne respecte pas celles de la classe B. Les limites de la classe A ont été établies pour des matériels destinés à être installés en milieu industriel. Elles sont valables pour des distances de protection de 30 m.
– La classe B est constituée pour les appareils qui respectent les limites de la classe B. Elle est applicable aux matériels de grande diffusion ou pouvant être installés en zone d'habitation. Ces limites sont valables pour une distance de protection de 10 m.

On appelle *distance de protection*, la limite à partir de laquelle le champ électromagnétique perturbateur n'a plus d'incidence sur l'environnement.

Tableau 9.9 – Degré de perturbation, valeurs maximales à ne pas dépasser.

	Classe A		Classe B	
Plage de fréquence de mesure	distance 30 m	distance 1 m	distance 10 m	distance 1 m
30 à 230 MHz	30 dBµV/m	58 dBµV/m	30 dBµV/m	46 dBµV/m
230 à 1000 MHz	37 dBµV/m	63 dBµV/m	37 dBµV/m	53 dBµV/m

Rappel : 30 dBµV/m = 30 µV/m et 37 dBµV/m = 70 µV/m.

La distance de mesure est la distance séparant l'appareillage sous test de l'antenne de mesure.
Ces mesures demandent un site exempt de tous champs extérieurs en champ libre ou en chambre blindée anéchoïque.

Mesure du champ électromagnétique

La mesure de l'intensité d'un champ électromagnétique offre deux intérêts différents :

– La vérification de la tenue des normes annoncées ci-dessus. En génération de champ pour le contrôle de l'immunité d'un système cette mesure permet de régler le niveau d'émission et de vérifier l'homogénéité du champ autour de l'échantillon sous test. En contrôle de l'émissivité, elle permet de connaître le champ émis par l'appareillage sous test.
– Le contrôle d'ambiance industrielle. Préventivement avant toute installation ou en cas de problèmes liés aux parasites électromagnétiques, cette mesure permet de quantifier le niveau de champ dans l'environnement immédiat du système à installer ou qui montre des dysfonctionnements aléatoires et de faire l'analogie entre la présence d'un champ pouvant dépasser les caractéristiques annoncées par le constructeur et un défaut intempestif.

La mesure du champ électrique se fait le plus souvent en V/m, l'appareil de mesure s'appelle un *champmètre*. Il existe deux types de champmètre dont les utilisations sont très différentes.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Champmètre à bande étroite

Cet appareil nécessite une antenne calibrée, il est utilisé pour la mesure des faibles champs à partir de quelques µV/m, il permet de connaître le niveau de champ pour chacune des fréquences discrètes composant le spectre de l'onde en mesure.
Il est du type analyseur de spectre ou récepteur de mesure, son utilisation demande du temps et de très bonnes connaissances techniques, son coût est très élevé et ses caractéristiques de bande de fréquence mesurable dépendent essentiellement du type d'antenne utilisé et de la calibration de celle-ci.
Généralement, il faut accorder cette antenne à chaque fréquence de mesure sinon il faut utiliser des antennes spécifiques large bande. Dans tous les cas, il faut plusieurs antennes pour couvrir le domaine normatif.
Son volume et son poids le destinent surtout aux mesures en laboratoire.

☐ Champmètre à large bande

Cet appareil possède son propre capteur de petite dimension, il est utilisé pour la mesure des champs forts, généralement à partir de 0,1 V/m, il mesure la valeur efficace du champ. Son capteur peut être anisotropique ou isotropique.
Sa petite taille, son coût et sa mise en œuvre très aisée le destinent à des mesures par du personnel non qualifié sur tous les sites ou règne une activité électromagnétique que ce soit pour la maintenance ou pour l'installation de système électronique ou informatique.
La bande passante de mesure est très large, elle couvre avec un seul capteur toutes les fréquences normatives.
Ce type d'appareil est indispensable pour le contrôle de génération de champ ou pour la qualification des sites servant à la vérification des tenues aux normes.
La généralisation quasi systématique de systèmes de commande et de régulation électroniques, dans l'industrie, la bureautique, chez le particulier… génèrent de sérieuses perturbations dans l'environnement immédiat des appareillages et sur les réseaux électriques.
Si aucune disposition n'était prise, le bon fonctionnement de ces installations deviendrait rapidement anarchique.
Des normes concernant la CEM ont été précisées dans CEI 61010 et sont applicables depuis janvier 1996, fixant ainsi des limites de deux types : l'*émissivité* et l'*immunité* (on dit aussi *susceptibilité*).

☐ Description du mesureur de champ C.A 43 (*figure 9.55*)

Appareil portatif de petites dimensions, le C.A 43 mesure le champ électrique présent dans l'atmosphère environnant sa sonde de mesure.
La **sonde isotropique EF2**, livrée en standard, est constituée d'une antenne associée à un détecteur haute fréquence.
La large bande passante de cet ensemble permet la mesure des champs électriques compris entre **0,1 V/m à 200 V/m** pour des fréquences comprises entre **100 kHz à 2,5 GHz**.
La gestion de la mesure, de l'affichage, des calculs et de la précision de l'appareil est assurée **par microprocesseurs**.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 9.55 – Mesureur de champ C.A 43.

L'**afficheur LCD** de grandes dimensions comporte :

– un affichage numérique 2 000 points,
– un affichage logarithmique par bargraph de 35 segments,
– différents annonciateurs de mesure pour une bonne compréhension des données affichées.

Une **sortie numérique bidirectionnelle**, **sur fibre optique** pour ne pas perturber les mesures, offre l'accès à toutes les informations pour impression ou traitement extérieur.

Le logiciel **Emigraph**, livré en standard avec le champmètre C.A 43, assure ce traitement sur PC.

■ Méthode de mesure avec le champmètre C.A 43

□ Émissivité

La norme limite la valeur du champ magnétique émis par un équipement en fonctionnement et par conséquent sa classe de compatibilité électromagnétique (CEM).

Les mesures de contrôle doivent être effectuées en rapprochant la sonde du C.A 43 de la source perturbatrice.

La sonde EF2, livrée avec le C.A 43 étant isotropique (ou omnidirectionnelle), ne nécessite pas de manipulations spéciales. Son élément sensible mesure le champ selon les trois axes, sans avoir à déplacer la sonde dans les trois plans. Il suffit de pointer la cible à bonne distance *d* pour effectuer la mesure.

Aucun obstacle ne doit s'intercaler entre la source et l'antenne de mesure pour être certain du résultat. L'opérateur lui-même ne doit pas se trouver entre la source perturbatrice et la zone à mesurer, le corps humain faisant écran au champ magnétique (*figure 9.56 a*).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

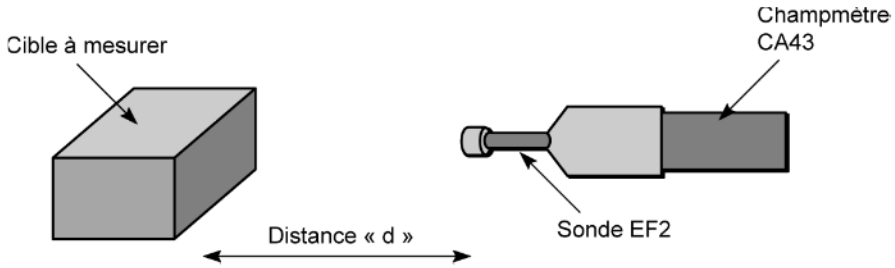


Figure 9.56 – (a) Disposition des éléments de mesure en émissivité.

☐ Valeurs à mesurer et à ne pas dépasser

Deux classes d'appareils sont définies pour tenir compte du lieu d'utilisation de l'appareillage sous test :

– classe A : les limites de la classe A ont été établies pour des matériels destinés à être installés en milieu industriel. Elles sont valables pour des distances de protection de 30 m ;
– classe B : les limites de la classe B sont applicables aux matériels de grande diffusion ou pouvant être installés en zone d'habitation. Elles sont valables pour des distances de protection de 10 m.

Nota : on appelle *distance de protection* la limite à partir de laquelle le champ électromagnétique perturbateur n'a plus d'incidence sur l'environnement.
La norme a pour but de limiter l'action d'une source perturbatrice sur un équipement plongé dans son champ magnétique.
Il convient, au préalable, de mesurer la valeur de ce champ magnétique pour vérifier qu'il ne dépasse pas les limites autorisées suivant les normes en vigueur.
Dans ces conditions, le fonctionnement de l'appareil sous test ne doit pas être altéré.

Degré d'immunité ou de susceptibilité

Le principe d'essais consiste à plonger l'appareillage à contrôler dans un environnement électromagnétique homogène créé par un système d'émission d'ondes radioélectriques entretenues et calibrées (*figure 9.56 b*).

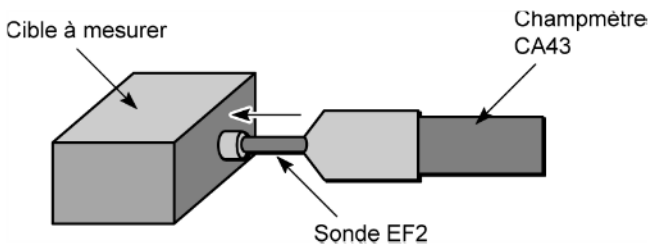


Figure 9.56 – (b) Disposition des éléments de mesure en immunité.

Procédures d'essais

Bande de fréquence : 80 MHz à 1000 MHz.
Modulation d'amplitude : 1000 Hz avec une profondeur de 80 %.
Site de test : chambre blindée ou anéchoïque.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Mesure du champ généré : utilisation d'un mesureur de champ de préférence isotropique placé à proximité immédiate pour le contrôle de l'homogénéité autour de l'appareil sous test.

Niveau de champ généré : trois classes spécifiées déterminent le degré d'immunité de l'appareil sous test :

– classe ou niveau 1 : intensité du champ à générer 1 V/m ;
– classe ou niveau 2 : intensité du champ à générer 3 V/m ;
– classe ou niveau 3 : intensité du champ à générer 10 V/m.

Sonde EF1

La sonde EF1 est de type anisotropique.

La réception, donc la mesure, s'effectue dans la seule position verticale.

Lorsque le champ est perpendiculaire, la sensibilité est maximale.

À 90° par rapport à l'axe de détection verticale, la sensibilité est minimale.

Du fait de l'anisotropie de la sonde EF1, pour effectuer une mesure, il est nécessaire de déplacer la sonde dans tous les plans, selon les trois axes (*figure 9.57*).

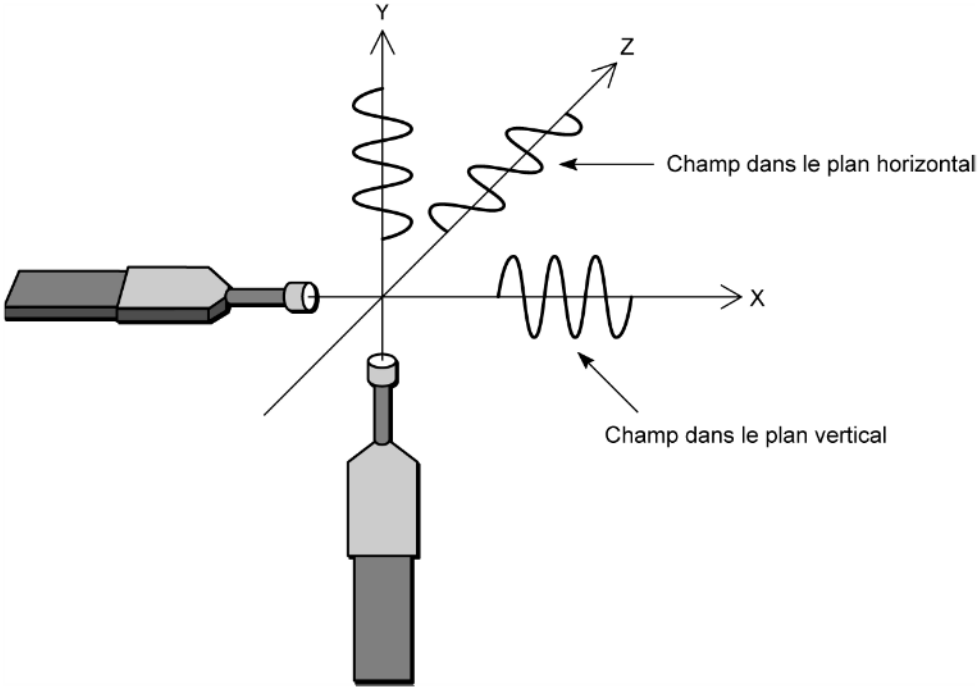


Figure 9.57 – Disposition des éléments de mesure dans les trois axes (avec la sonde anisotropique EF1).

Logicel Emigraph

Une fois la bretelle de fibre optique raccordée entre le mesureur de champ et l'adaptateur de type série bidirectionnel pour PC, il est possible d'exploiter les résultats des différentes mesures à l'aide du programme Emigraph prévu à cet effet.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Autres tests en CEM

□ Directive basse tension/sécurité électrique

La mise sur le marché de tout équipement électrique ou électronique impose de respecter les exigences des normes européennes.
La conformité à ces directives permet au fabricant d'apposer le marquage CE sur ces produits et ainsi d'accéder à leur libre circulation dans tout l'espace européen.
Deux directives sont applicables.
La directive sécurité électrique ou directive basse tension (DBT) 73/23/CEE obligatoire depuis le 1er janvier 1997. Elle rassemble toutes les normes de sécurité électrique suivantes :

- EN 60950 : machines de bureau et de traitement de l'information.
- EN 60335-1 : appareils électrodomestiques et analogues.
- EN 61010-1 : appareils de tests et de mesures de laboratoire.
- EN 60204-1 : équipement électrique des machines industrielles.
- EN 60598-1 : luminaires.
- EN 61131-2 : automates programmables, spécifications et essais d'équipement.

La directive CEM ou compatibilité électromagnétique 89/336/CEE obligatoire depuis le 1er janvier 1996.
Nous allons passer en revue quatre tests de base communs à la majorité des normes :

□ Test de tenue en tension

Il permet de vérifier que les lignes de fuites et les distances dans l'air respectent les conditions de sécurité.
Pour les appareils de classe 1, on applique une tension entre le conducteur de phase et le neutre relié ensemble et le conducteur de protection. Pour les appareils de classe 2, on applique à l'aide d'une sonde une tension d'essai entre le conducteur de phase et le neutre reliés ensemble et les diverses parties critiques de l'appareil.
Au cours de l'essai, on vérifie qu'il ne se produit aucune perforation ou contournement, en surveillant l'évolution du courant de fuite.
Exemple : pour les luminaires de classe 1, la tension d'essai est de 1 250 V et, pour ceux de la classe 2, de 4 000 V.
Ces tests appelés aussi *tests diélectriques* sont réalisés par des postes de claquage : ces postes permettent d'appliquer une tension directe sur une cible (appareil à tester) au moyen d'un pistolet haute tension commandé à distance ou par application d'une rampe progressive de tension croissante ou décroissante commandée manuellement par l'utilisateur.
Selon l'application envisagée, deux types d'essais sont à envisager :

- les essais destructifs de la cible sans disjonction (carbonisation de la matière isolante), réalisés en laboratoire spécialisé ;
- les essais non destructifs avec disjonction pour vérifier la tenue en tension du diélectrique et contrôler les appareils en fin de fabrication. Pour détecter l'impulsion de claquage, évaluer la tension limite au-delà de laquelle il y aurait perforation de l'isolant et déclencher l'arrêt de la haute tension dans le délai le plus court

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

possible, ces appareils offrent deux méthodes : la méthode de détection par seuil de courant et la méthode de détection de variation de courant.

La *méthode de détection par seuil de courant* est utilisée pour les composants résistifs faiblement capacitifs. Le détecteur de défaut prend en compte la totalité des courants sortant du générateur (actif + réactif). Le courant doit dépasser la valeur de consigne de disjonction pendant au moins 40 µs. Cet intervalle de temps a été délibérément choisi pour éviter de prendre en compte les décharges partielles qui surviennent juste avant le claquage. Ce type de détection est aussi bien utilisé en courant continu qu'en courant alternatif.
Mais en courant alternatif pour les composants fortement capacitifs, le courant réactif peut être très important, dans ce cas on préférera utiliser la *méthode de détection par variation de courant*. Cette méthode utilise un circuit de filtrage permettant de ne détecter que les variations rapides de courant de fuite. Dans ce circuit, les variations rapides liées aux phénomènes de claquage sont inchangées. L'impulsion doit dépasser la valeur de consigne de disjonction pendant au moins 40 µs.

☐ Isolement

Il permet de vérifier que la résistance d'isolement reste supérieure à une valeur minimum spécifiée dans la norme. Lors de l'essai avec un appareil de classe 1, une tension continue stable de 500 V est appliquée entre le conducteur de neutre et de phase reliés ensemble et on vient mesurer le courant circulant entre les deux parties du montage. La résistance d'isolement doit être supérieure à 2 MΩ.
En classe 2, il est nécessaire d'utiliser une sonde qui sera appliquée aux divers points critiques de l'enveloppe de protection.

☐ Courant de fuite

Il permet de vérifier que dans les conditions normales de fonctionnement, le courant de fuite de la source d'alimentation par rapport aux parties accessibles est inférieur à la valeur maximale admissible spécifiée par la norme. Ce test permet de mettre en évidence une détérioration de certains composants ou une connexion défectueuse de l'équipement.
Pour les appareils de classe 1, on mesure le courant circulant entre la phase et/ou le neutre et la borne de terre de protection. Ce test est effectué en condition normale de fonctionnement et l'équipement sous test est sous tension nominale par l'intermédiaire d'un transformateur d'isolement. Le circuit de mesure de courant de fuite simule l'impédance du corps humain. Le courant de fuite limite doit être compris entre 0,01 mA et 10 mA.
Selon l'équipement, comme le conducteur de protection des appareils de classe 2 n'existe pas, une terre de référence d'essai doit être déterminée.

☐ Contrôle de continuité de terre

Ce test permet de vérifier que toutes les parties accessibles d'un appareil de classe 1, susceptibles d'être portées à une tension dangereuse pour l'utilisateur en cas de défaut d'isolement, sont correctement reliées au conducteur de protection de l'installation électrique. Un courant circule entre chaque partie conductrice accessible et la prise

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

de terre de l'équipement. En mesurant la chute de tension entre ces deux parties du montage, on détermine la résistance qui doit être inférieure aux prescriptions de la norme.

Appareillages :

– mégohmètre numérique,
– mégohmètre programmable de table pour laboratoire.

Ce dernier permet de faire des essais de résistances d'isolement de câbles ou de contrôler les courants de fuites des condensateurs. On peut lui adjoindre un scrutateur de voies (jusqu'à 40 voies) pour réaliser des tests en série de câbles multipoint ou des condensateurs, l'ensemble du balayage des 40 voies s'effectuant en moins de 2,5 s.

Caractéristiques :

– Gamme de mesure jusqu'à 10^{15} Ω et 1 pA.
– Gamme de tension d'essai : 10 à 2 kV suivant modèle.
– Modèle adapté pour les condensateurs possède une sortie supplémentaire pour la précharge des composants.
– Interfaces RS232 et GPIB.
– Sorties de seuils opto-isolées.
– Sélection de courant de test, retard au déclenchement.
– Nombre de séquences de tests en mémoire.
– Seuils programmables pour tri de composants.
– Grande vitesse de test (52 ms entre chaque).
– Modèle HT avec sortie flottante.

Postes de claquages 6 kV ou 10 kV.

Postes de claquages à courant continu 15/30 kV.

Fonctions communes à tous les postes de claquages :

– Tension d'essai réglable.
– Lecture de tension de sortie sur galvanomètre ou afficheur numérique.
– Commande à distance et témoin lumineux de présence tension en sortie.
– Temporisation pour régler le temps de maintien de la tension en courant alternatif
– Essais non destructifs par disjonction en mode seuil de courant ou en mode variation du courant.
– Signalisation de disjonction par témoin lumineux et par déclenchement d'un contact en face arrière.
– Mémorisation de la tension de claquage sur galvanomètre.
– Borne de terre en face avant.
– Prise de raccordement extérieure en face arrière pour boucle de sécurité, sortie disjonction, présence de tension d'essai, entrée réarmement auxiliaire et sortie analogique 1 V/kV.

☐ Sécurité

La haute tension n'est présente en sortie que lorsque l'opérateur appuie sur un commutateur astable.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Coupure automatique de la source HT dès l'apparition du claquage en mode de détection de défaut (*figure 9.58*).
Pistolet de test avec pointe escamotable et commande à distance de la haute tension.
Bouton d'arrêt d'urgence sur les modèles de forte puissance.
Bornes de sécurité verrouillable pour sortie HT.
Boucle de sécurité.
Protection de l'appareil par fusible.
Conforme aux normes de sécurité électrique en vigueur.

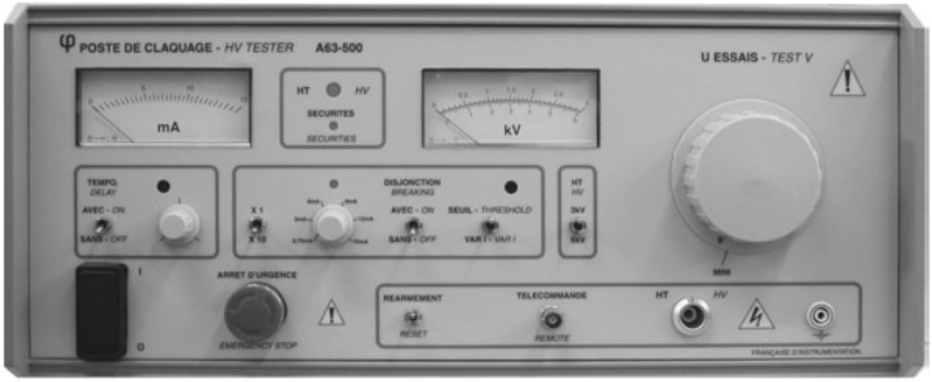


Figure 9.58 – Poste de claquage 6 kV FI A63-500.

La *figure 9.59* présente un **testeur de conformité de machines ou de chaîne de production**.

Figure 9.59 – Testeur de conformité machine C.A 6160.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Fonctionnalité de ce type d'appareil :

– Mesures de tenue en tension.
– Mesure d'isolement.
– Meure de courant de fuite.
– Mesure de continuité de terre.
– Mesure de tension résiduelle.
– Mesure de puissance.
– Tests fonctionnels combinables aux choix ou en séquences automatiques.

□ Compatibilité électromagnétique

Définition de la CEM : aptitude d'un équipement ou d'un système à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement et sans introduire de perturbations intolérables par son environnement.

On distingue à ce sujet deux notions, vues précédemment :

– L'**émission** : dans la plupart des cas, il faut analyser de manière approfondie les émissions conduites de 9 kHz à 30 MHz et les émissions rayonnées de 30 MHz à 1 GHz à l'aide d'analyseurs de spectres, d'antennes HF, de réseaux de stabilisation d'impédances de ligne (RSIL ou LISN). De nombreuses normes génériques ou harmonisées définissent les niveaux d'émissions acceptables en fonction de la fréquence (EN 55022, EN 55015, EN 55014, EN 50081-1, EN 50081-2).
– L'**immunité** : on distingue l'immunité conduite de l'immunité rayonnée.

La norme générique EN 50082-1 spécifie les limites d'immunité pour les environnements commerciaux, résidentiels et industriels légers, la norme générique EN 50082-2 spécifie les limites d'immunité en environnement industriel.

■ Appareillages

□ Générateurs de perturbations

Fonctionnalités :

– Mesures de creux de tension CEI 1000-4-11.
– Mesure de transitoires en salves CEI 1000-4-4.
– Mesure de décharges électrostatiques CEI 1000-4-2.

□ Générateurs de foudre

Fonctionnalités :

– Essai sur appareils monophasés, sur lignes d'interconnexion ou équipements triphasés avec appareillage additionnel.
– Sortie auxiliaire de tension de choc pour connexion à un autre réseau de couplage.
– Sortie sur oscilloscope.
– Programmation du type de couplage, de la tension d'essai, de l'intervalle entre deux impulsions, du nombre d'impulsions et de l'angle de phase.
– Norme CEI 1000-4-5.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Générateur de décharges électrostatiques

Fonctionnalités :

- Trois modes d'essai : décharge au coup par coup, décharge dans l'air en continu, décharge en mode séquence.
- Nombre d'essais en mémoire.
- Signal sonore d'indication de décharge.
- Norme CEI 1000-4-2.
- Détection du type de tête de décharge (dans l'air ou par contact).

☐ Analyseurs de flickers et d'harmoniques

Fonctionnalités de l'analyseur de spectres à balayage pour CEM (*figure 9.60*) :

- Étude des perturbations conduites et rayonnées.
- Analyseur contrôlé par PC par logiciel de pilotage et d'analyse et d'archivage sous Windows.
- Détection crête, quasi-crête, maintien des valeurs moyenne, maximale et minimale.

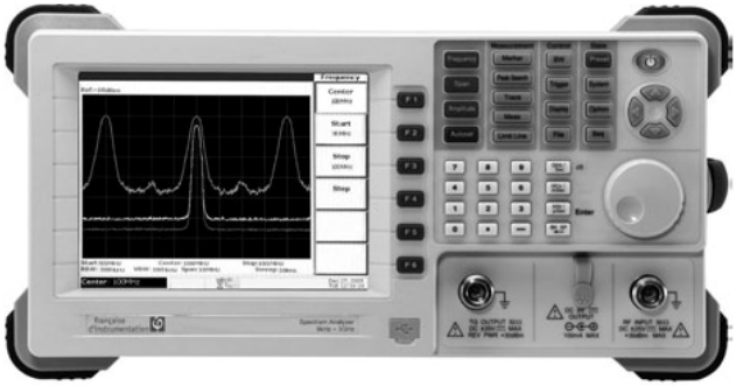


Figure 9.60 – Analyseur de spectres à balayage pour CEM.

☐ Chambre d'essai CEM en perturbations rayonnées

Cette chambre avec écran souple permet de s'affranchir de l'environnement électromagnétique de la mesure des perturbations rayonnées avec un analyseur de spectre et lors du test en champ haute fréquence sur un équipement. L'alimentation est distribuée en interne.

Cette structure souple et légère est constituée d'une armature rigide en aluminium facile à assembler et d'une toile (polyester/cuivre/nickel). L'atténuation offerte dépasse les 80 dB dans la bande passante de fréquence de 30 MHz à 1 GHz. Elle est équipée d'une porte avec fenêtre d'observation et d'un plancher en bois plaqué acier galvanique et toutes les charnières sont écrantées (*figure 9.61*).

Figure 9.61 – Chambre d'essai CEM en perturbations rayonnées.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

10 • CHAÎNES D'ACQUISITION

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Il s'agit de présenter tout autre système d'acquisition que ceux déjà traités dans l'instrumentation pour PC au paragraphe 4.5 du chapitre 4.

10.1 Autres centrales d'acquisition : appareils de génération et d'acquisition modulaire

Ce genre d'appareil modulaire permet par son nombre de voies d'entrées de réaliser un grand nombre de mesures simultanément de grandeurs et de nature très différentes (courant, tension, température…) en toute sécurité (entrées différentielles) de traiter ces mesures et de les sauvegarder ou de les transférer vers un autre lieu à partir d'un PC.
L'intérêt est donc de limiter le nombre d'appareil en garantissant un bon niveau de qualité et de sécurité de mesure.
La *figure 10.1* donne un exemple de système d'acquisition modulaire Recdigit d'Enerdis.

Figure 10.1 – Système d'acquisition de tableau.

Parfaitement adapté à l'évolution des contraintes industrielles, un grand nombre de voies (10 à 300) par modules déportés, des modules d'entrées universelles et isolées : mV/V/mA/couples/Pt100/contact/impulsions/tension et courant alternatif, modules

de sorties avec alarmes : 4 niveaux par voie, vitesse de scrutation 500 ms, mémoire interne de 1 à 4 Mo, fonctions mathématiques et transfert numérique possibles. Certains modules d'acquisition d'ACR notamment seront traités dans le chapitre 11 « Mesure de la température ».

10.2 Indicateurs numériques et analogiques

Objectif : indiquer les valeurs des grandeurs à mesurer, quelle que soit la technologie analogique, à fût rond, à fût carré DIN43700, boîtier modulaire Normeurope (*figure 10.2*), ou numérique MIC, MIN, MAS, programmables, alphanumériques.

10.2.1 Applications possibles

- Mesure de courant en alternatif ou continue (*figure 10.3*).
- Mesure de tension en alternatif ou continue.
- Mesure de fréquence et fréquencemètre double à lames.
- Mesure de puissance monophasée ou triphasée.
- Mesure du facteur de puissance.
- Synchronoscope.
- Différences de tensions.
- Indicateur à fonctions de commande.
- Compteurs horaires/chronomètre.
- Ohmmètre.
- Tachymètre.
- Thermomètre couple et Pt100 Ω.

Figure 10.2 – Boîtier modulaire Normeurope.

Figure 10.3 – Ampèremètre alternatif.

10.2.2 Les différents types d'indicateurs

■ Indicateurs analogiques

Différents types d'échelles :

- normale : mesure de courant alternatif dans les installations industrielles ou bâtiments ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– moteur : mesure de courant absorbé par un moteur en fonctionnement normal et pendant la période de démarrage. Branchement direct sur TC ;
– pseudo-linéaire : pour mesure de tension entre deux phases et entre phase et neutre par commutation ;
– dilatée : pour mesure de tension avec une grande facilité de lecture dans la plage d'utilisation.

Choix et justification des échelles pour les indicateurs analogiques :

– Échelle pseudo-linéaire : pour des mesures de tension entre deux phases et entre phase et neutre par commutation.
– Échelle dilatée : pour des mesures de tension avec une grande facilité de lecture dans la plage d'utilisation choisie (*figure 10.4*).
– Échelle normale : pour des mesures de courant alternatif dans les installations industrielles peu inductives (*figure 10.5*).
– Échelle moteur (*figure 10.6*), ou transformateur : pour la mesure du courant absorbé par un moteur en fonctionnement nominal mais aussi pendant la période transitoire de démarrage. Branchement direct ou sur transformateur de courant.

Figure 10.4 – Échelle dilatée.

Figure 10.5 – Échelle normale.

Figure 10.6 – Échelle moteur.

Les **avantages** des indicateurs numériques par rapport aux analogiques sont le multicalibrage (Vac, Iac, Vtrms, Itrms, F, phasemètre, thermomètre couple J, K, T,

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

S, Pt100 Ω, capteur pour jauge de contrainte, recopieur potentiométrique…), l'encombrement, la taille et la couleur de l'afficheur.
Mais aussi certains numériques sont programmables (par 3 touches en face avant) et peuvent mémoriser les valeurs maximales et minimales, une liaison série favorise la télémesure, les mesures des grandeurs suivantes : tension, courant, signaux de process, tachymètre, fréquencemètre, compteur, chronomètre peuvent être acquises sur PC grâce à un logiciel adapté.
Vous trouverez sur le site web de Chauvin Arnoux, les documentations techniques des indicateurs numériques de mesure.

■ Indicateurs numériques

Figure 10.7 – Indicateur numérique C.A 2100.

Tableau 10.1 – Tableau de choix document Chauvin Arnoux (Enerdis).

Modèle	MIC	MIN	NUMERIC	EURODIGIT	EURODIGIT	MAS	MAS FC	MAS	C.A 2100-X	C.A 2200-X
Nbre points	2000	2000	1000	2000	20000	2000	2000	20000	10000	10000 mini (3)
Format	25 x 75	25 x 75	48 x 48	48 x 96	48 x 96	48 x 96	48 x 96	48 x 96	48 x 96	48 x 96
Fonctions de mesure										
Voltmètre DC	■	■	■	■	■	■ (2)	■	■	C.A 2100-E	
Ampéremètre DC	■	■	■	■	■	■ (2)	■	■	C.A 2100-E	
Télémesure	■ (1)	■		■	■	■ (2)	■	■	C.A 2100-P	C.A 2200-P
Voltmètre AC		■	■	■	■	■ (2)		■	C.A 2100-E	
Ampéremètre AC		■	■	■	■	■ (2)		■	C.A 2100-E	
Thermomètre couple		■		■		■ (2)			C.A 2100-T	C.A 2200-T
Thermomètre Pt100		■	■	■	■	■ (2)			C.A 2100-T	C.A 2200-T
Ohmmètre		■				■ (2)		■		
Fréquencemètre		■	■	■		■ (2)		■	C.A 2100-F	C.A 2200-I
Tachymètre									C.A 2100-F	C.A 2200-I
Compteur		■				■ (2)			C.A 2100-I	C.A 2200-I
Chronomètre		■				■ (2)			C.A 2100-I	C.A 2200-I
Pont de jauges		■				■ (2)		■	C.A 2100-C	C.A 2200-C
Potentiomètre		■				■ (2)		■		C.A 2200-P
Fonctions particulières										
Sortie analogique				option					option	option
Liaison RS 232									option	option
Liaison RS 485									option	option
Sortie(s) seuils				2 ou aucun			deux		option	option
Sortie BCD					option					option
MIN/MAX									oui	oui
Détails en page	p. 61	p. 62	p. 68	p. 68	p. 68	p. 63	p. 64	p. 63	p. 65	p. 65

(1) Ne traite pas les signaux avec décalage d'origine, type 4…20 mA par exemple.
(2) Egalement disponible en version Commutateur 5 voies : voir page 64
(3) de ±10000 à ±100000 pt selon les modèles : voir page 67

Remarque

Il existe aussi des indicateurs bargraph qui permettent à l'utilisateur de situer la valeur par rapport à l'étendue de la mesure, des afficheurs permettant d'informer l'utilisateur par des messages pré-programmés, ainsi que des imprimantes alphanumériques éditant les valeurs des mesures, l'état de la machine, les messages d'erreur et peuvent-être connectés à des automates programmables par liaison RS232 ou RS485.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus par l'article L 122 5 2° et 3° a) du code de la Propriété Intellectuelle.

Des shunts de calibre 2 A/200 mV ou 5 A/200 mV sont à utiliser pour les mesures de courant en AC et DC sur des voltmètres de tableau de calibre 200 mV analogiques ou numériques (revoir le principe du shunt de courant au chapitre 8).

10.2.3 Où et comment installer un indicateur ?

Branchement d'un indicateur numérique selon Socomec (*figure 10.8*) :

– SN1 : ampèremètre.
– SN5 : indicateur de fréquence.
– SN9 : indicateur programmable courant-tension continu.
– SN10 : cosinusphimètre mono et triphasé.

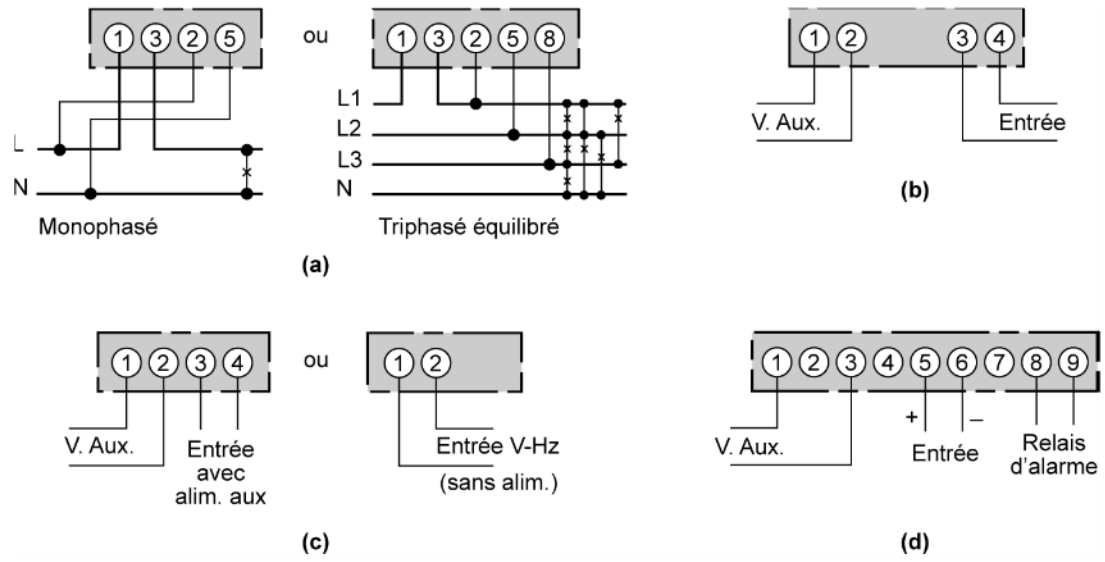


Figure 10.8 – Branchement d'un indicateur numérique selon Socomec.

10.2.4 Comment choisir un indicateur ?

Voir *figure 10.9*.

10.2.5 Caractéristiques des indicateurs numériques

Étendue de la mesure, calibre, résolution, impédance d'entrée, chute de tension en ampèremètre, caractéristique de l'alimentation, qualité diélectrique, nombre de points de mesures, type d'afficheur, hauteur des digits, précision et consommation du circuit d'alimentation, types de boîtier, type de fixation et l'indice de protection (par exemple IP52).
Pour les indicateurs à aiguilles, il faut rajouter : la déviation de l'aiguille (par exemple 90° – 240°), le type de fréquencemètre (à aiguille ou à lames et le nombre de lames, par exemple 13, 17 ou 21 lames).

10.2.6 Normes

Elles prennent en compte l'indice de protection IP, le matériau de boîtier selon UL, l'utilisation selon le climat (0… + 50 °C) et la température de stockage (– 25… + 85 °C).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

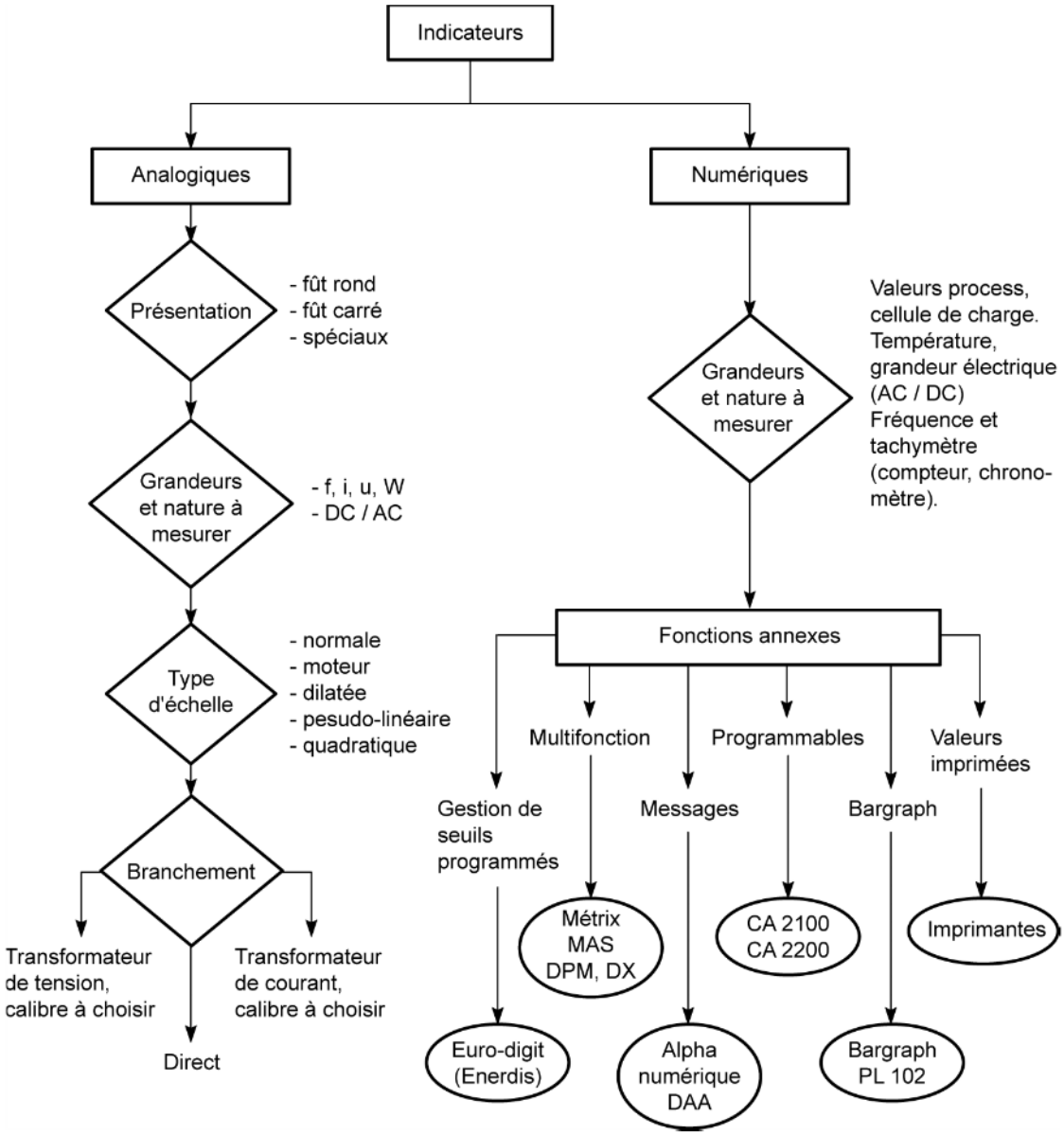


Figure 10.9 – Choix d'un indicateur.

10.3 Transducteurs et convertisseurs de mesure numériques et analogiques

Objectif : leur but est de traduire des grandeurs physiques aux valeurs élevées en signaux bas niveaux courant continu ou tension normalisée (0-10 mA, 4-20 mA ou 0-10 V, 0-100 V). On distingue les numériques, souvent programmables en local grâce à un logiciel adapté, des analogiques configurés à la fabrication. Certains montés en boîtier embrochable permettent de ne pas interrompre le circuit courant lors de leur débranchement et d'intervenir sur une installation en état de fonctionnement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

10.3.1 Applications possibles

- Cellules moyennes tensions pour réaliser un suivi des grandeurs (I, U, P, Q) dans le cadre de la supervision.
- Télémesure en HT ou MT avec affichage.
- Conversion de puissances active et\ou réactive en une fréquence proportionnelle ou une émission d'impulsions avec ou sans sortie analogique.
- Transformation économique d'appareil équipé d'un calibre 2 mA en phasemètre, puissancemètre (wattmètre, varmètre).
- Conversion et isolation de signaux de télémesure normalisés.
- Mesure en efficace ou efficace vraie, en échelle standard ou dilatée, sortie comptage.

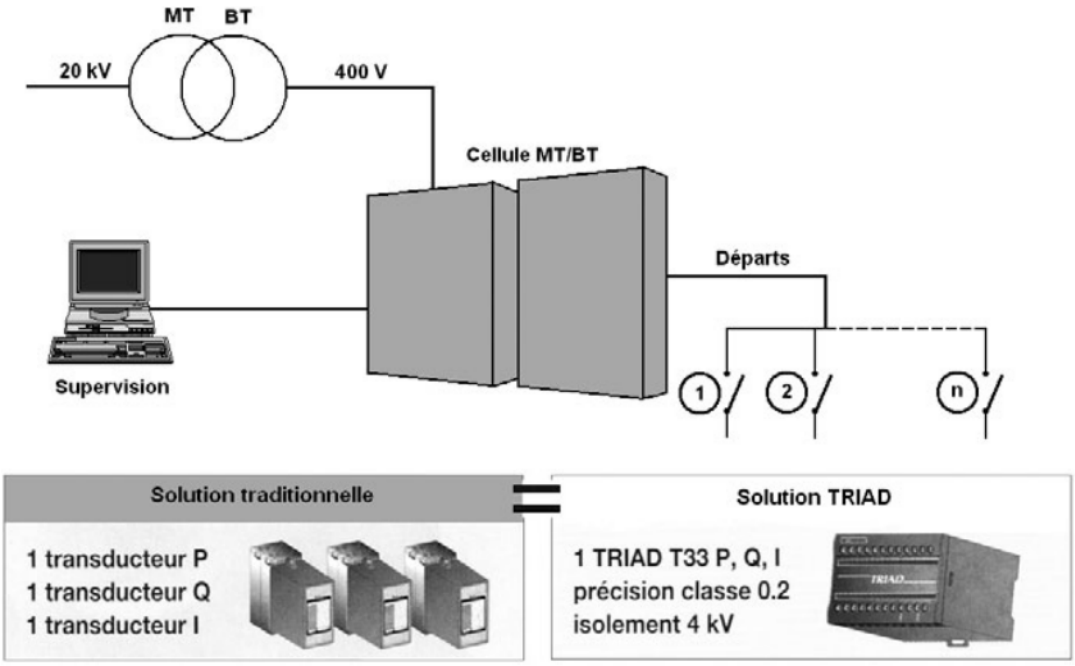


Figure 10.10 – Triad (Chauvin Arnoux).

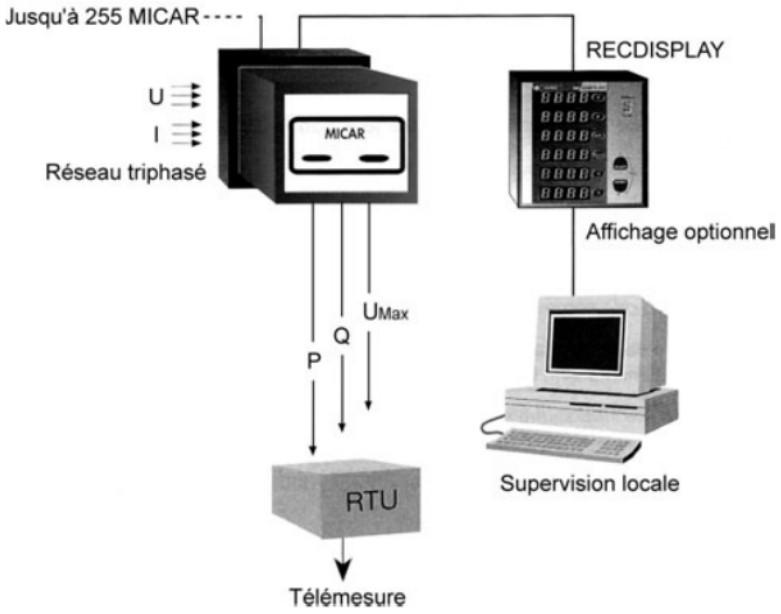


Figure 10.11 – Micar (Chauvin Arnoux).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

10.3.2 Les différents types de transducteurs

■ **Analogiques** (*figure 10.12*)

Figure 10.12 – CDM3 (Enerdis/Chauvin Arnoux).

□ **De puissance**

Les PAF et QAF sont destinés à la conversion d'une puissance active ou réactive en fréquence proportionnelle ou en impulsion avec ou sans sortie analogique.
Mesures effectuées : les valeurs peuvent être en efficace ou en efficace vraie, au choix.

– Tension.
– Courant.
– Température.
– Angle de phase.
– Synchronisation.
– Fréquence.

Deux types :

– grandeurs d'entrées de type continues ;
– grandeurs d'entrées de type alternatives.

Variante : ils sont embrochables ou en rack.

– Télécomptage : des Wh+, et Wh– ou VARh+ ou VARh– par relais ou transistors de 25 à 36 000 imp/h pour alimenter des compteurs d'impulsions électromécaniques ou un automate programmable.
– Télémesure des W ou VAR par transistor sortie en fréquence 0,001 Hz à 10 000 Hz.

□ **Modèle de puissance à ininterruption du circuit courant**

Ce modèle est en grandeur alternative d'entrée uniquement, son avantage est de pouvoir changer de transducteur sans arrêter l'installation, les fonctions sont principalement identiques au modèle ci-dessus en puissance mais se limitent à une seule

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

fonction par unité : puissance (monophasée et triphasée) ou courant ou tension ou fréquence ou angle de phase.

□ **Convertisseur d'appareil de mesure**

Ce transducteur permet de convertir un appareil possédant un calibre 2 mA en un puissancemètre (monophasé ou triphasé) ou mesureur d'angle de phase.
Il a la particularité d'être alimenté par le signal à mesurer et ne nécessite pas par conséquent, d'alimentation auxiliaire.

□ **Convertisseur de signaux de télémesure**

Il est chargé de convertir et d'isoler les signaux de télémesure normalisés.
La séparation galvanique est de 1,5 kV entre entrée/sortie/alimentation.
La précision inférieure à 0,5 %, bande passante de 20 kHz.

Tableau 10.2 – Différents modèles de transducteurs dans la gamme CDT (Chauvin Arnoux).

Grandeur d'entrée	Grandeur de sortie	Fonction
0… +– 10 V	0… +– 10 V	Isolation
0… 10 V	4… 20 mA	Isolation + conversion
0… 10 V	0… 20 mA	Isolation + conversion
0… 20 mA	0… 20 mA	Isolation
0… 20 mA	0… 10 V	Isolation + conversion
4… 20 mA	4… 20 mA	Isolation
4… 20 mA	0… 10 V	Isolation + conversion

L'alimentation est de 24 V_{DC} par alimentation auxiliaire ou par module d'alimentation régulée capable d'alimenter deux modules à partir de la tension secteur.

■ **Numériques programmables** (*figure 10.13*)

□ **Multifonctions (ou mini-centrale de mesure)**

Il permet de regrouper en un seul boîtier d'obtenir les mêmes fonctions que trois transducteurs réunis, il mesure U, V, I, P, Q, S, F, cosφ « en courant fort », en monophasé ou triphasé équilibré ou non sur 1, 2, 3 sorties analogiques bas niveaux (en courant ou en tension).
Il est programmable par PC + logiciel adapté (rapport de transformateur de mesure, étendue de la mesure, courbe de transfert, niveau de sortie…), de grande précision (classe 0,2), 4 kV d'isolement, son temps de réponse est inférieur à 350 ms, prend en compte des harmoniques jusqu'au rang 40 et respecte la plupart des normes CEM.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 10.13 – Transducteur programmable (Enerdis/Chauvin Arnoux).

Tableau 10.3 – Fonctions usuelles des transducteurs.

	TSPI	TSPU	Basic functions			Advanced functions			
	I (RMS) self-powered	U (RMS) self-powered	I (True RMS)	U (True RMS)	F	S	P	Q	Cos φ Power factor
Input									
Nominal value In (A) Vn (V) Fn (Hz)	1A or 5A	110/√3, 110, 120/√3, 120, 230 or 400 V	1A or 5A	100/√3, 110/√3, 100, 110, 230 or 400V ❶	50 Hz or 60 Hz	In: 1A ou 5A and Vn: 100/√3, 110/√3 V or 230 V Un: 100, 110, 230 or 400V ❶			
Measuring range (X)	0…100 % In	0…100% of Un or Vn	0…Xmax with Xmax > 0.5 In and < 1.3 In	0…Xmax with Xmax > 0,5 Vn and < 1.2 Vn	X1…X2 with Fn - 5 Hz ≤ X1 ≤ Fn -1 Hz Fn +1 Hz ≤ X2 ≤ Fn +5 Hz [accuracy 0.2% X2]	0…Xmax ou Xmin…Xmax with 0,7 Sn ≤ Xmax ≤ 1,3 Sn Sn = Un x In (single phase) Sn = Un x In x √3 (T3F) ❷ or Sn = Vn x In x 3 (T4F)			0.5 Cap…1…0.5 Ind 0.8 Cap…1…0.2 Ind (other values, please consult us)
Output									
Output range (Y)	0…10 mA or 0…20 mA; or 0…5 Vdc or 0…10 Vdc		Configurable per the following transfer curves: 0… Ymax or Ymin…Ymax with -20 mA ≤ Ymax ≤ +20 mA and Ymax - Ymin ≥ 5 mA or -10 V ≤ Ymax ≤ +10 V and Ymax - Ymin ≥ 2.5 V						
Operating resistance	current output: ≤ 15 V/Ymax		voltage output: ≥ 1 kΩ						
Overrun at output	current: 1.1 Ymax		voltage: 1.1 Ymax						
Response time	< 100 ms	< 200 ms	< 350 ms						
Accuracy	Cl. 0.2: from 10 to 100% of In from 20 to 100% of Vn		Class 0.2 (± 0.2% of the input range)						

❶ other nominal values configurable from 50 to 480 V ❷ measuring range adjustable within the indicated limits; class 0.5 if 0.4 Sn ≤ Xmax < 0.7 Sn

☐ Transducteur de télémesures en HT/MT

Conçu pour fonctionner dans des environnements sévères, ce transducteur programmable est un moyen technique économique pour réaliser un ensemble de mesures à distance en HT, MT avec affichage ou/et supervision locale (*figure 10.14*). Il offre les fonctions suivantes :

- 3 sorties analogiques programmables sur U, V, I, P, Q, S, F, cosφ ;
- 1 sortie communicante par liaison numérique ;
- 1 sortie RS232 pour la programmation et la visualisation locale à l'aide d'une mini-console.

Grandeurs mesurées : U, V, I, P, Q, S, F, cosφ (par phase ou total).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L. 122-5 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 10.14 – Modèle programmable de transducteur (Chauvin Arnoux).

☐ Transducteurs programmables de haute précision

Ce transducteur de précision (0,05 à 0,1 %) suivant le type de capteur connecté permet de mesurer des grandeurs comme la température, le courant et la tension : Il est programmable par PC par liaison RS232 ou en local par console.

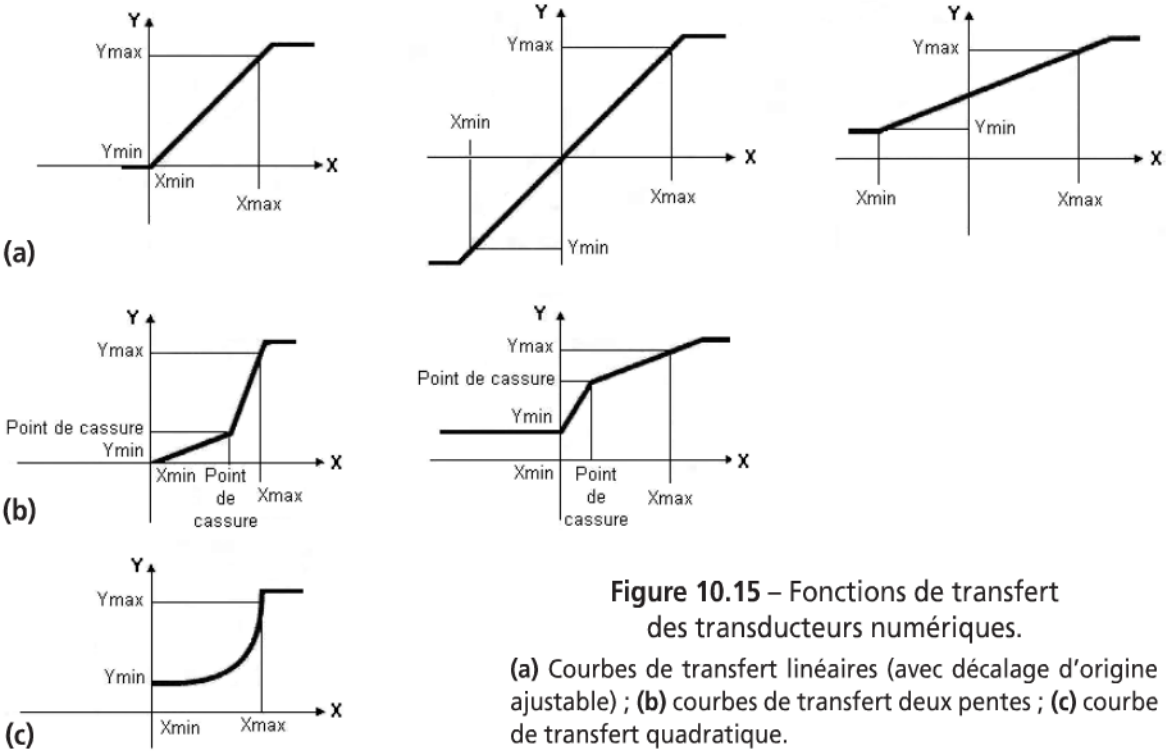


Figure 10.15 – Fonctions de transfert des transducteurs numériques.

(a) Courbes de transfert linéaires (avec décalage d'origine ajustable) ; **(b)** courbes de transfert deux pentes ; **(c)** courbe de transfert quadratique.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Entrées : thermocouples J, K, T, S, B, R, N, Pt100, courant – 30 mA/30 mA, tension – 100 mV/+ 100 mV, – 4 V/+ 10 V, compensation soudure froide interne ou externe, sécurité haute ou basse en rupture capteur, extraction racine carrée, alimentation capteur intégrée 24 V DC régulée.
Sorties : analogiques 0/20 mA ou 4/20 mA sur 600 Ω, fonction de transfert programmable (*figure 10.15*). Numérique RS232 ou RS485, protocole JBUS™.
Les fonctions de transfert sont adaptées au type de grandeurs à relever, et existent avec le décalage à l'origine, en double pente et pour des variations non linéaires…

10.3.3 Où et comment installer un transducteur (*figure 10.16*) ?

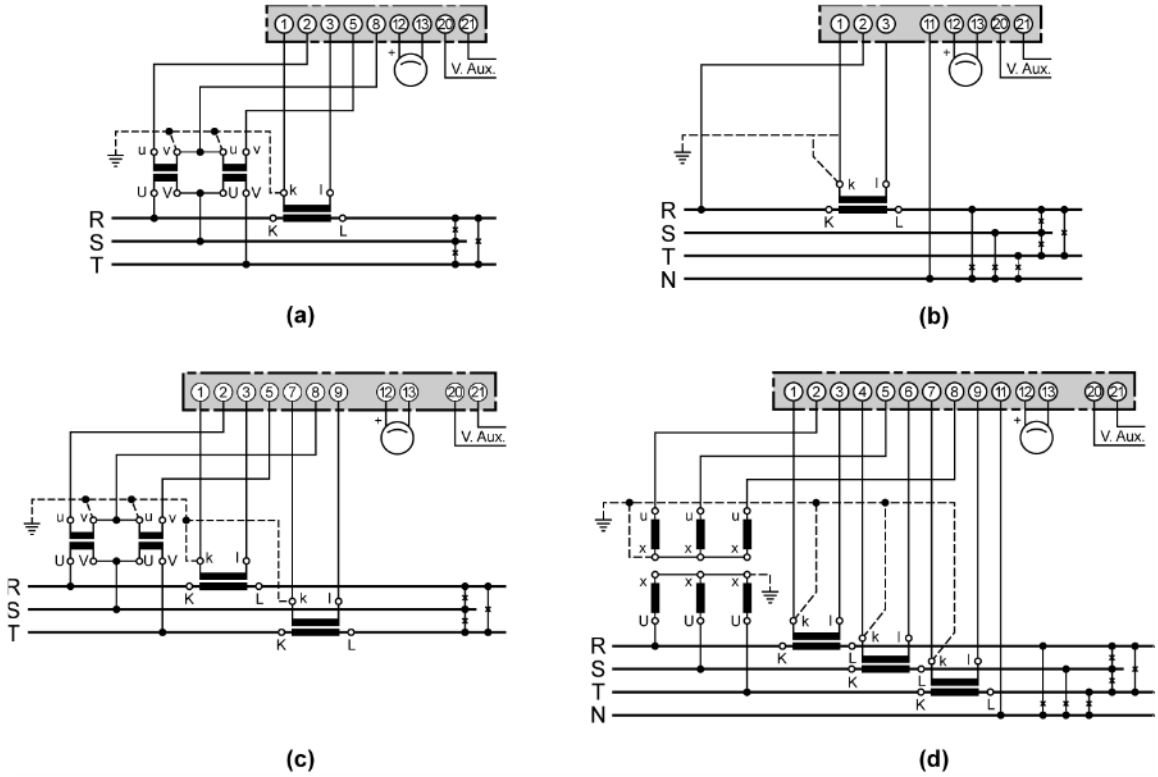


Figure 10.16 – Branchement d'un transducteur Enerdis en monophasé ou triphasé, équilibré ou non.

10.3.4 Comment choisir un transducteur ?

Voir *figure 10.17*.

10.3.5 Caractéristiques

Qualité diélectrique entre entrée-sortie, entre alimentation et bornes, entre masses et bornes, classe de précision, temps de réponse, indice de protection, surcharges du circuit courant et du circuit tension, résistances de charges max : consommation, température d'emploi, taux d'ondulation résiduel, fréquence d'emploi.

10.3.6 Normes

CEI 688 (EN 60688, VDEN 60688, BS 60888…).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

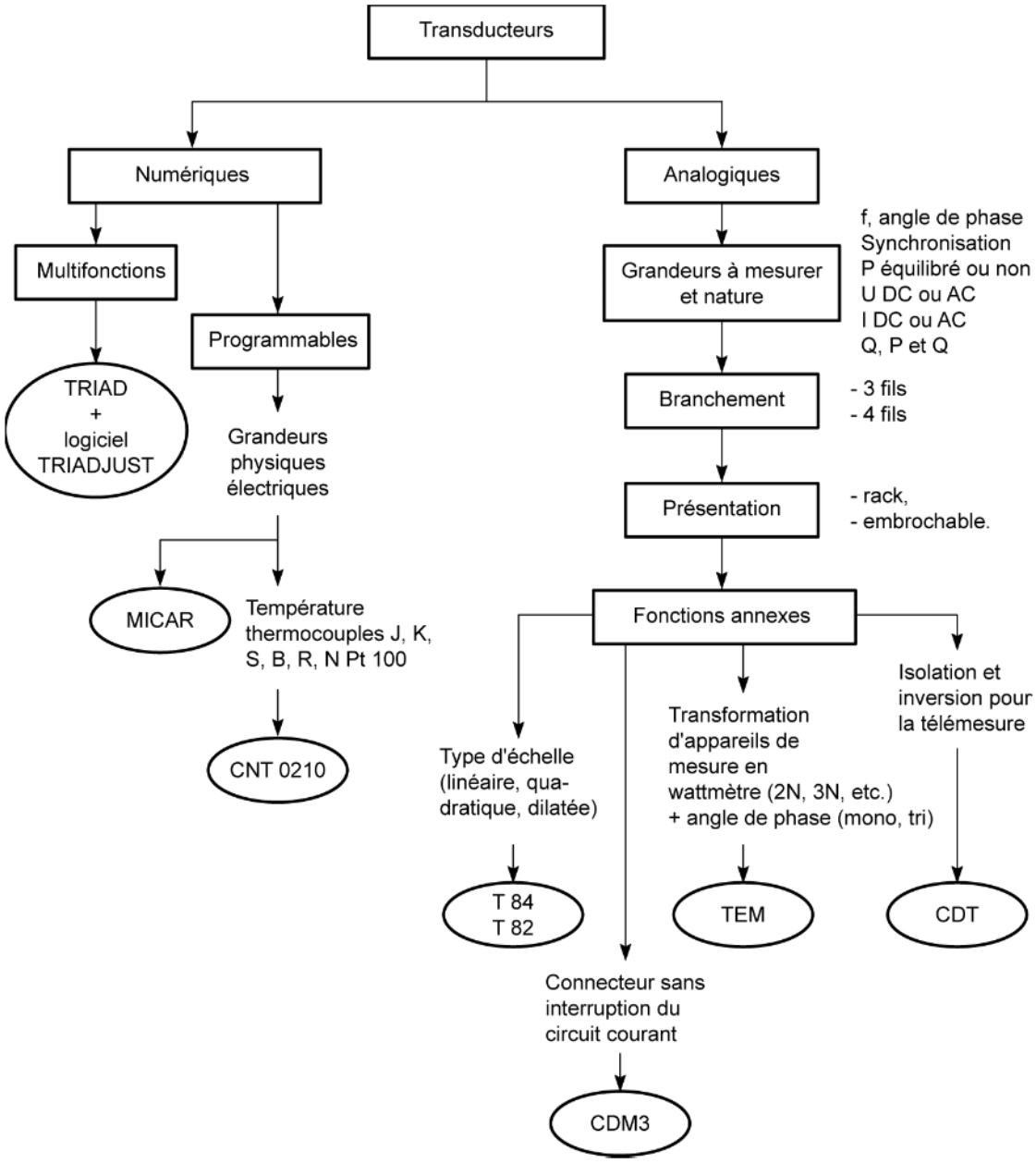


Figure 10.17 – Choix d'un transducteur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

10.4 Data logger

De plus en plus dans l'industrie, la connaissance de paramètres à l'instant *t* comme sur une plage temps définie est indispensable au process utilisé ; ces data logger (*figure 10.18*) permettent de récupérer des données en courant AC, DC en tension AC RMS, DC et en température (sonde interne et externe).

On dénombre une dizaine de data logger : courant RMS (0-1 Vac), courant RMS (0-1 Aac), tension RMS (0-25 Vac), tension RMS (0-300 Vac), tension RMS (0-600 Vac), courant DC (0-25 mAdc), tension DC (0-100 mVdc), température (thermistance interne), température (thermistance interne et externe).

Figure 10.18 – Simple logger™.

10.4.1 Caractéristiques générales

Nombre de voie, fréquence d'acquisition : 4 096 échantillons/h maximum soit 1/s, capacité d'enregistrement : 8 192 valeurs, algorithme de compression de données : TXR® (*Time Extension Recording*), alimentation : pile 9 V, température d'utilisation : – 20 °C à 70 °C, température de stockage : – 20 °C à 80 °C, humidité relative : 5 à 95 % HR sans condensation, dimension 73 × 59 × 41 mm, normes : CEI 1010 cat. III pollution 2, logiciel d'exploitation des données Windows™, cordon PC-Simple logger™.

10.4.2 Mode d'utilisation

Il faut connecter la pince ampèremétrique (différents modèles existent en fonction du module utilisé) au module enregistreur ou la thermistance avec son câble.

Un seul bouton poussoir permet de démarrer et d'arrêter l'enregistrement ainsi que l'effacement de la mémoire.

Le logiciel est unique quel que soit le modèle d'enregistreur.

Fonctionnalités du logiciel : récupération de données mémorisées, visualisation graphique, statistique à l'écran, zoom sur le graphe, export de données et de graphiques dans un tableur ou autres applications, impression des listings enregistrements et graphiques.

10.4.3 Applications possibles

■ **En courant**

– Industries, maintenance : moteurs, gestion d'énergies, surcharge de câbles, dérivation des alimentations, stabilité du courant et donc de la puissance.
– Distributeurs d'énergies, régies d'électricité : contrôle et diagnostic, campagne de mesures.
– Services publics : contrôle débits et charge d'alternateurs, groupes électrogènes, générateurs et toutes installations électriques, gestion d'énergie.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ **En tension**

– Distributeurs d'énergies, régies d'électricité : contrôle et diagnostic, campagne de mesures.
– Services publics : contrôle débits et charge d'alternateurs, groupes électrogènes, générateurs et toutes installations électriques, gestion d'énergie.
– Sociétés de services : diagnostique de matériel informatique (banque, grande distribution), diagnostique d'une installation.

■ **En température**

– Agriculture, élevage (couveuse, serre, stockage de céréales).
– Bâtiment : climatisation, chauffage, chantier mobile : peinture, plâtre.
– Industrie alimentaire : stockage, entreposage, brassage.
– Industrie du tabac : séchage, stockage.
– Médical : transport sanguin.
– Services : musées, services météorologiques, organisme HLM…
– Transport : suivi de marchandise routier, maritime, ferroviaire, aéronautique.

■ **Process**

Tout secteur : contrôle « monitoring » des capteurs et commandes de process, analyse de défauts ou d'anomalies, mémorisation directe et création de graphes de pression, température, débit… contrôle de batteries.

■ **Conclusion**

Avantages : l'utilisateur possédant déjà une pince ampèremétrique compatible avec un module utilisé peut n'acheter que le logiciel et le module.
Inconvénients : il faut acheter le module + la pince + le logiciel ou une pince enregistreuse complète.

■ **Pince ampèremétrique enregistreur numérique AC RMS** *(figure 10.19)*

Avantages : moins coûteux que l'achat séparé d'un module, d'une pince et du logiciel.
Même utilisation qu'un module, un seul bouton poussoir permet le démarrage, l'arrêt de l'enregistrement ainsi que l'effacement de la mémoire.

Figure 10.19 – C.A 601.

10.4.4 Choix des data logger

Voir *figure 10.20*.

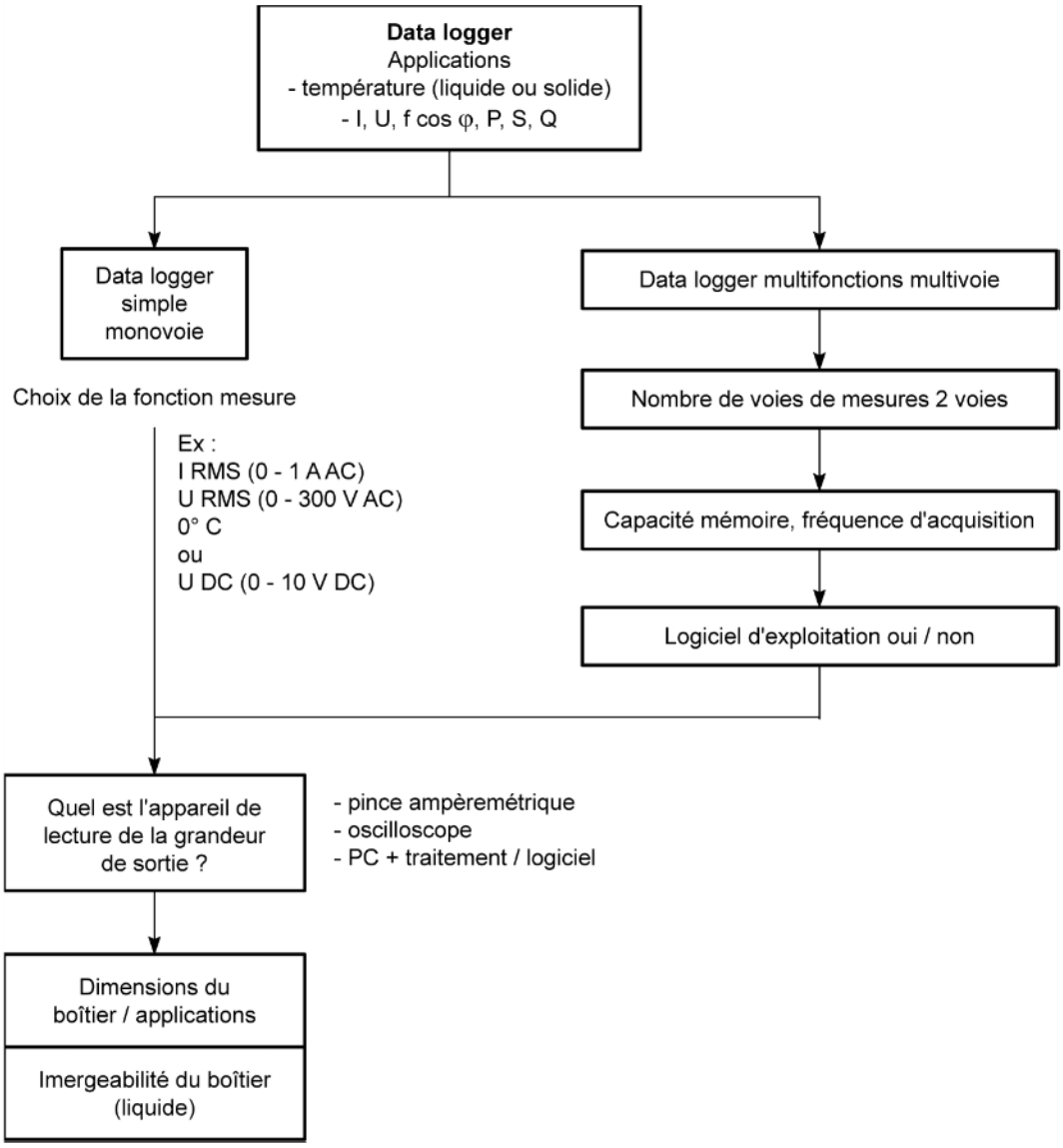


Figure 10.20 – Choix des data logger.

10.4.5 Caractéristiques essentielles

Type de mesure (courant DC ou AC RMS, ou tension DC ou tension RMS, température…), échantillonnage (jusqu'à 4 096 valeurs par heure), la résolution, le nombre de voie, la consommation (autonomie de la pile), la capacité d'enregistrements (> 8 000) et méthode de stockage, la taille, le logiciel sous Windows.

Caractéristiques mécaniques : température de stockage et fonctionnement, altitude, degré de protection contre les chocs, dimensions, masse, type d'entrée et de sorties, fixation…

10.4.6 Normes

Caractéristiques de sécurité d'ordre électrique :

– Isolation double ou renforcée selon CEI 1010-1.
– Modèle 300 V cat. III pollution 2 et 600 V cat. III, pollution 2.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Caractéristiques de sécurité d'ordre électromagnétique (CEM) :

– EN 50081-1 : classe B.
– EN 50082-2 : décharge électrostatique : CEI 61000-4-2, champ rayonné : CEI 61000-4-3, transitoires rapides, champ magnétique à 50/60 Hz : CEI 61000-4-8.

Remarque

Il existe des modèles AmpFlex Chauvin Arnoux 605 et 607 pour mesure de courant AC RMS de 0 à 5 kA avec une résolution de l'ordre de 2,5 A pour 5 kA, et un diamètre d'enserrage 45 cm à 80 cm.

Les applications sont :

– surcharges sur les câbles et les transformateurs ;
– contrôle de débit et de charge d'alternateur, générateur ou groupe électrogène ;
– mesure sur jeux de barres peu accessibles ;
– mesure en environnement humide ou en présence d'eau.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

10.5 Enregistreurs

10.5.1 Objectif et présentation

Avant tout développement de ce sujet, il est important d'apporter certaines précisions.
Les évolutions technologiques, notamment dans le domaine de l'informatique, ont provoqué la disparition des traceurs (analogiques) et plotters (numériques) de petits formats, tels que les A3 et A4 (plus fabriqués dans l'ensemble des grands constructeurs connus). Seuls subsistent encore les plotters de grand format, comme les A0 et A1, qui trouvent encore leurs justifications dans le tirage de plans d'architecture ou de patrons dans la confection (par exemple).
Nous assistons actuellement au même phénomène en ce qui concerne les enregistreurs « papier ».
Ils sont remplacés, pour les travaux neufs, par des systèmes informatisés. Ces systèmes n'empêchent pas l'impression papier à la demande, par contre, ils offrent l'avantage de pouvoir traiter les informations par divers calculs, traitements graphiques, stockages de masse, transmission à distance…
Le marché devient petit à petit un marché de remplacement (SAV) pour les installations existantes.

10.5.2 Applications

Très utilisés pour les relevés de température, de météorologie, de vibrations, de débit, de pression ou des grandeurs électriques (courant, tension, puissance active, réactive, fréquence, facteur de puissance), ils permettent entre autre de :

– surveiller en permanence l'évolution de grandeurs électriques ou physiques ;
– comparer leur évolution sur un même papier ou diagramme ;
– enregistrer l'historique de l'évolution de phénomènes ;
– déclencher des alarmes sur l'une des grandeurs mesurées et faire basculer des relais de sortie pour venir piloter un automate programmable.

Certains offrent la possibilité d'alimenter des capteurs 2 fils.

10.5.3 Présentation des différents modèles

■ **Enregistreurs « papier » à disque** (*figure 10.21*)

Ils se présentent sous deux formes :

□ **Mécaniques**

– Mécaniques à capteur intégré, utilisés principalement pour les mesures de températures ambiantes.
– Mécaniques à capteurs déportés ; le capteur est composé d'un bulbe contenant un gaz et raccordé à l'enregistreur par un tube capillaire. Ils sont utilisés pour divers types de mesures de températures ou de pression (tube de Bourdon). Dotés d'un système d'horlogerie mécanique, ils ont une autonomie de quelques jours à plusieurs mois.

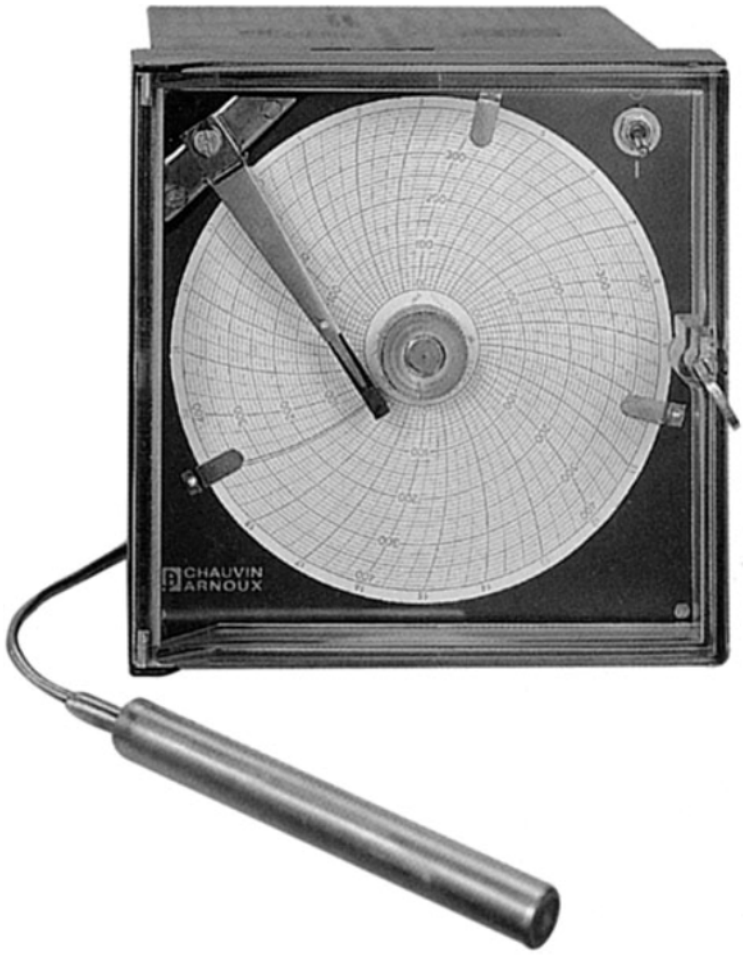


Figure 10.21 – Minitracer.

□ **Électroniques**

Raccordés à un signal électrique de télémesure, ils permettent d'enregistrer sur disque de papier des températures à partir de thermocouples, de signaux de télémesures tensions (0 à 10 V) ou courants (4 à 20 mA).

■ **Enregistreurs de process à rouleau de « papier »**

On peut les classer en deux grandes familles :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

□ **Enregistreurs à tracé par points ou « à pointé »** (*figure 10.22*)

Figure 10.22 – Ecopointer.

Ils sont utilisés principalement pour enregistrer des phénomènes lents, comme la température par exemple.
La température d'un objet varie rarement rapidement.
Par conséquent, par économie de papier et pour étendre l'autonomie de l'enregistreur, il est inutile de tracer en continu ces variations. Quelques points, tracés côte à côte, suffisent à les interpréter assez précisément.
Ils comportent généralement plusieurs voies pour le contrôle, la surveillance et l'enregistrement des variables électriques, physiques et physico-chimiques.
Les tracés des voies sont effectués en différentes couleurs pour faciliter le repérage.
Les entrées peuvent être numériques ou/et logiques, avec ou sans paramétrages de seuils (alarmes).
Ils peuvent comporter des sorties relais, analogiques, numériques ou logiques.
En plus de l'impression sur papier, ils peuvent être équipés de voyant lumineux et d'affichages numériques des valeurs et unités.
Exemples d'entrées : thermocouples, Pt100 Ω, courants et tensions de process, valeurs de potentiomètres.

□ **Enregistreurs à tracé continu** (*figure 10.23*)

Ce type d'enregistreur trouve sa justification lorsqu'il est nécessaire de visualiser des phénomènes rapides, de comparer des phénomènes impulsionnels par rapport à un signal normalisé, etc.
Les principaux paramètres contrôlés et enregistrés sont : débit, pression, vitesse, niveau, pH, température, courant et tension normalisés de télémesure…
Ils sont équipés d'une ou plusieurs voies indépendantes et d'alarmes paramétrables par l'utilisateur. La vitesse de défilement de la bande de papier est réglable.
Les entrées analogiques peuvent être à haut ou bas niveau.
La *figure 10.24* présente un enregistreur graphique à tracé continu.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

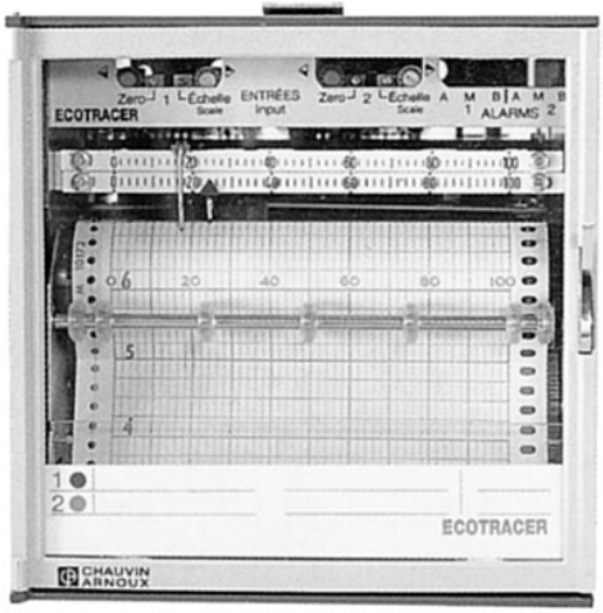


Figure 10.23 – Ecotracer.

Figure 10.24 – Europont X2000.

Comme les appareils à tracé continu, les enregistreurs graphiques sont destinés au contrôle et suivi des phénomènes rapides.

Les principaux paramètres contrôlés (éventuellement via des convertisseurs) et enregistrés sont U, I, F, cosφ, var, watt, grandeurs physiques…

Mesures de boucles de télémesure (5 mA, 4-20 mA, 100 mV pour shunt…).

Ils sont aussi équipés d'une ou plusieurs voies indépendantes et d'alarmes paramétrables par l'utilisateur. La vitesse de défilement de la bande de papier est sélectionnable (de quelques minutes à plusieurs heures).

■ Enregistreurs « informatisés »

On peut les classer en deux grandes familles :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

□ **Enregistreurs « aveugles »** (*figure 10.25*)

Figure 10.25 – ASM 8 : mesure et surveillance des charges des réseaux triphasés BT (Enerdis).

« Boîtes noires » à incorporer à l'intérieur des armoires électriques, ils ont pour principe d'enregistrer des données récupérables par un système informatique (PC).

Couramment appelés *data logger*, *simple logger*, certains modèles sont aussi capables de piloter des process industriels après avoir transmis leurs données vers un calculateur.

Ils peuvent accepter, directement ou indirectement, tout signal selon la configuration de la ou des entrées.

Une fois transmises sur PC, il est possible au travers d'un logiciel de transcrire les données sous différentes formes graphiques (bargraph, courbes, histogramme, camembert…).

□ **Enregistreurs « vidéo »** (*figure 10.26*)

Ce type d'enregistreur représente le plus récent aboutissement de la technologie.

Équipé d'un écran LCD TFT, il permet la suppression des consommables (papier), la suppression de la mécanique (cause d'usure, de ralentissement d'acquisition des mesures et leur transcription), le choix par l'utilisateur : des paramètres et de la façon de les afficher (sous forme numérique, de tableau, de courbes, de bargraph…), des couleurs (256)…

Il peut scruter très rapidement ses multiples voies (18) à grande vitesse (200 ms/voie).

Muni de tiroirs interchangeables, il peut contrôler tout type de paramètres physiques ou physico-chimiques.

Il est aussi d'une grande précision grâce à une conversion sur 18 bits.

Communiquant, il peut transmettre à distance les données via son interface Ethernet et même être piloté d'un autre site.

Il peut aussi être raccordé à un système informatique par RS232 ou RS485.

Il est équipé d'une mémoire Compact Flash amovible d'une capacité pouvant atteindre jusqu'à 128 Mo.

Un logiciel d'exploitation pour PC complète utilement l'ensemble.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 10.26 – Pyrotracer C.A 650.

10.5.4 Choix d'un enregistreur

Voir *figure 10.27*.

10.5.5 Fiche technique

■ **Caractéristiques principales des enregistreurs à tracé continu ou par points**

La précision, l'échelle de lecture, le dispositif d'encrage (feutres…), le temps de réponse, la résistance extérieure maxi, la vitesse de déroulement du diagramme, les sorties analogiques : 0… 5 V pour 0 à 100 %, les alarmes : sur relais 3-230 Vac résistif, l'alimentation, la consommation 10 VA.

Mécaniques : IP, dimensions, masse, découpe panneau, conditions climatiques et tenue aux chocs.

■ **Caractéristiques principales des enregistreurs vidéo**

Type de tracé : multipoints 45 tracés, largeur de diagramme, type d'affichage VGA, nombre d'entrées maximal (512 via un réseau pour le 4250D d'Eurotherm), nombre max d'entrées contact, nombre max de sorties analogiques, nombre max de sorties relais, mode de communication (modbus), capacité mémoire, lecteur de carte mémoire type I ou III, fonctions mathématiques, minuteries, compteurs, totalisateurs, configuration par PC via un logiciel, découpe de panneau, protection IP.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

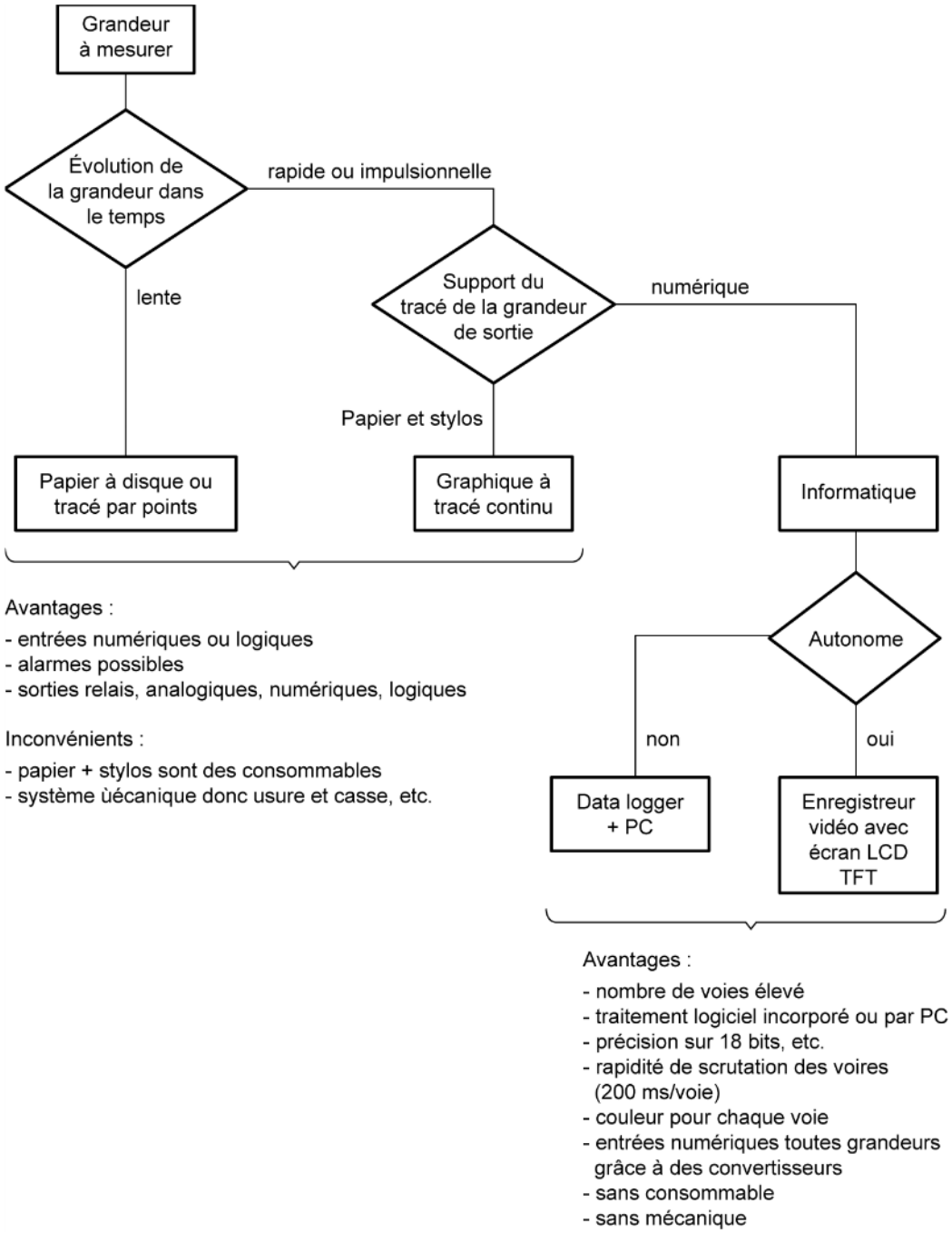


Figure 10.27 – Choix d'un enregistreur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

10.6 Matériels entrant dans la chaîne d'acquisition

10.6.1 Alimentations stabilisées

Objectifs : fournir une source d'énergie réglable continue ou/et alternative afin d'alimenter tout circuit électrique dans les limites des caractéristiques de celle-ci.

Ces appareils sont intimement liés à la mesure par leur utilisation quasiment journalière dans des secteurs comme la maintenance, la conception de produits ou la recherche.

Applications : maintenance de matériels électroniques, recherche et test de prototype, enseignement en électronique et électrotechnique, industrie en électronique.
Rappels technologiques : basée sur le principe de la régulation linéaire par transistor ballast, les alimentations fonctionnent en mode de tension constante soit en mode de courant constant soit les deux associés. Leur caractéristique est de type rectangulaire (*figure 10.28*).

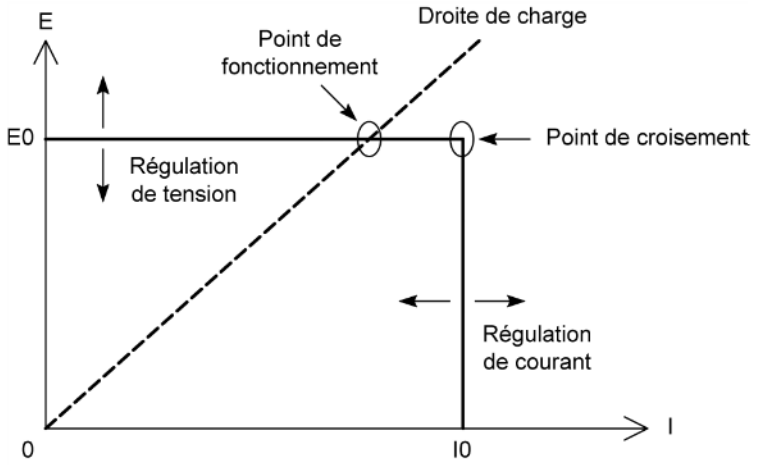


Figure 10.28 – Caractéristique tension-courant d'une alimentation stabilisée.

Les valeurs de tensions et de courant sont indiquées par des afficheurs numériques ou analogiques mais l'utilisation d'un ampèremètre et un voltmètre externes est dans certains cas nécessaire en cas de non utilisation par le constructeur d'un potentiomètre de réglage fin.
Les différentes catégories d'alimentations stabilisées :

■ Alimentations stabilisées simples *(figure 10.29)*

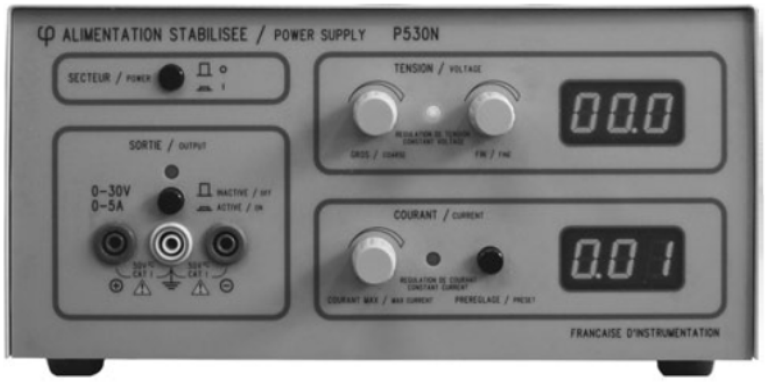


Figure 10.29 – Alimentation 1 voie, 30 V à 2,5 A (Française d'instrumentation).

■ Alimentations stabilisées double ou triple

En plus des caractéristiques communes aux alimentations simples, elles possèdent un mode maître/esclave, appelé *tracking* de façon à asservir la tension de sortie d'une voie (esclave) par rapport à l'autre (maître) pour obtenir un mode symétrique.
Les voies peuvent fonctionner en série, séparément ou en parallèle. Elles peuvent être de puissance ou non. Les sorties sont en général flottantes.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

■ Alimentations programmables (*figure 10.30*)

Elles possèdent un clavier en face avant de façon à programmer les caractéristiques de régulation *U*/*I*, des rampes de tension et créneaux (10 pas), la mémorisation de configuration, elles ont souvent plusieurs voies.

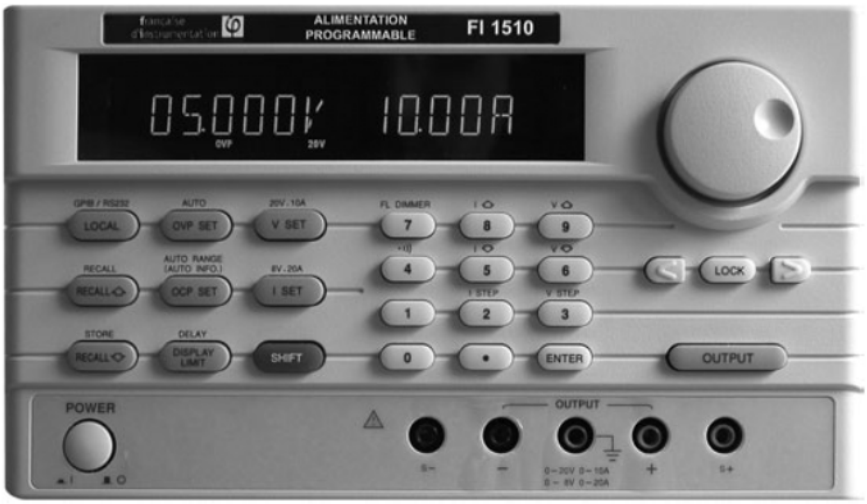


Figure 10.30 – Alimentation P530N, 3 voies, – 32 – 0 + 32 V et 5 V 3 A (Française d'instrumentation).

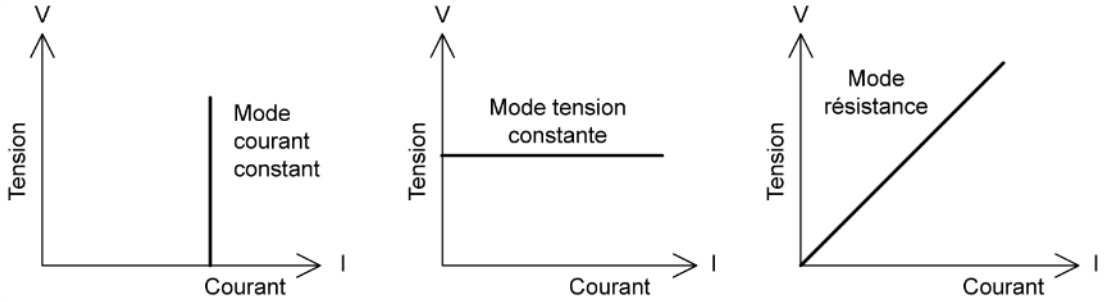


Figure 10.31 – Caractéristiques de régulation d'une alimentation programmable.

Spécifications : résolution, précision, ondulation résiduelle, dérive, temps de réponse, mémoire (sauvegarde et rappel de configuration), tension résiduelle, stabilité en charge et en ligne.

■ Alimentations spécifiques et mixtes (*figure 10.32*)

Comme leur nom l'indique, elles combinent la tension alternative et continue (12 ou 6 V) ou à sorties multiples de tension (3/4, 5/6/7, 5/9/12 V) ou symétrique.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

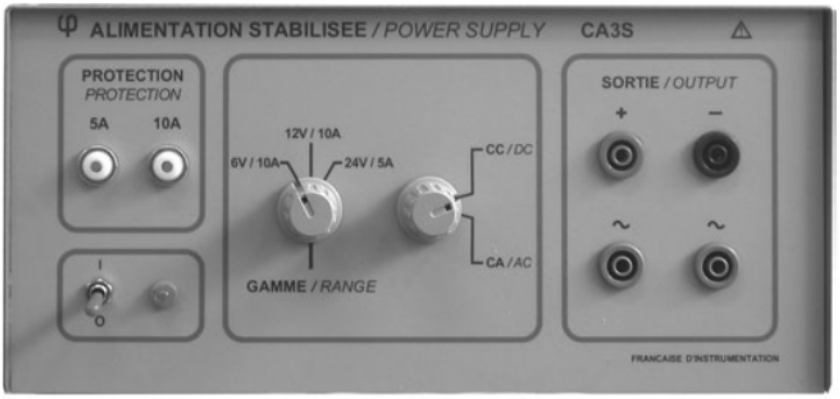


Figure 10.32 – Alimentations spécifiques CA3S (Française d'instrumentation).

☐ Alimentations de laboratoire

Ces alimentations sont comparables aux alimentations double ou triple mais sont de puissance bien supérieure à leurs consœurs (40 A, 150 V), elles possèdent souvent une prérégulation à thyristors et des étages de puissance à transistor MOSFET.

☐ Alimentations à découpage

De puissance jusqu'à 1,6 kW, elles permettent grâce à une montée en fréquence d'obtenir un très bon rendement (> 80 %) et donc un encombrement très réduit. Caractéristiques identiques aux alimentations doubles.

☐ Alimentations de tensions alternatives

Elles permettent d'obtenir une sortie sinusoïdale de puissance élevée avec une fréquence, une tension ou un courant variable et stable.

☐ Alimentation en mode arbitraire

Elle permet d'obtenir un signal de forme arbitraire en conjuguant par programmation les différentes formes de signaux possibles. Elle est souvent employée dans des tests de conformité de matériels électroniques.

Spécifications liées au mode arbitraire : nombre de pas, séquences en µs ou ms, nombre de répétitions, résolution en tension, paliers en µs, ms et s.

■ Protections communes à toutes les alimentations stabilisées

– Protection contre les courts-circuits par limitation de courant caractéristiques *U*/*I* rectangulaire.
– Contre les échauffements excessifs, par disjoncteur thermique et par relais sur le transformateur.
– Contre tout défaut par fusible au primaire du transformateur.
– Une diode de roue libre protège l'alimentation contre les surtensions accidentelles lors de commutations de charges inductives.
– Un circuit interne véhicule les courants inverses dus aux charges capacitives.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Choix d'une alimentation

Il est directement lié à la valeur et à la nature de la tension utilisée ainsi qu'à la valeur maximale du courant absorbée par le montage.

■ Normes

Sécurité : classe 1, conforme à la norme EN 61010-1, catégorie de surtension II, degré de pollution 2.
CEM : conforme aux normes EN 50082-1, critère d'aptitude B et EN 55011, ISM groupe I, classe B.
Rigidité diélectrique : 2 300 V entre entrée et sortie, 1 350 V entre entrée et châssis.
Résistance d'isolement > 100 MΩ/1 000 V entre sortie et châssis.
Sorties : bornes de sécurité, norme VDE 0110 et agréées BG.

10.6.2 Générateurs basse fréquence

■ Générateurs fréquencemètres

Le générateur de fonction permet d'obtenir un signal de forme et de fréquence variables mais aussi de mesurer la fréquence d'un signal externe.
Applications :

- Maintenance de matériels électroniques.
- Recherche et test de prototype.
- Enseignement en électronique et électrotechnique.
- Industrie en électronique.

■ Les différentes catégories de générateur basse fréquence *(figures 10.33 et 10.34)*

□ GBF simples

Caractéristiques du générateur : formes d'ondes, plage de réglage en fréquence, vobulation interne et externe, distorsion du signal sinusoïdal, réglage d'offset, taux de symétrie, temps de montée et de descente, niveau de sortie, résolution, sortie du générateur de balayage, atténuateurs, sortie de synchronisation externe.

Figure 10.33 – Générateur de fonction FI 5110.

Figure 10.34 – Générateurs de fonctions arbitraires Tektronix.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Fréquencemètres

Caractéristiques : gammes de mesure en fréquence (Hz), précision (Hz), sensibilité (mV RMS), mode fonctionnement HF ou BF, impédance d'entrée.

☐ Générateurs de fonctions arbitraires

Ils permettent de mémoriser toute forme de signal à partir d'un oscilloscope ou d'en créer directement à partir du générateur (battement cardiaque, impulsions d'allumage, train d'ondes, triangle, rampe positive, modulation de largeur d'impulsions…) pour tester tous les fonctionnements possibles de matériel électronique.
Caractéristiques du générateur arbitraire : plage de réglage en fréquence de la centaine de µHz à la quinzaine de MHz, formes d'ondes standards (sinus, carré, triangle, bruit gaussien, rampe, impulsions, tension continue…), nombre de signaux mémorisables, modulations internes AM/FM/FSK, mode de fonctionnement (continu, salve, déclenché), fonction balayage en fréquence linéaire ou logarithmique, nombre de configurations utilisateur en mémoire, distorsion harmonique totale, interface GPIB ou RS232, logiciel d'édition de formes d'ondes sous Windows.

■ Choix des générateurs fréquencemètres

Les générateurs fréquencemètres se choisissent en fonction du type et de la nature du signal à utiliser, certains possèdent des fonctions complémentaires qui peuvent permettent à l'utilisateur d'avoir un et même appareil plus complet.
Pour les signaux aléatoires ou d'un type particulier, le générateur de signaux arbitraires programmables est l'outil idéal.

10.6.3 Compteurs fréquencemètres

Ils permettent de visualiser et de mémoriser toute forme de signal impulsionnel et d'en définir ses caractéristiques (total, fréquence, rapport cyclique…), ainsi que de surveiller les glissements de fréquence, l'instabilité d'un système.
Applications : maintenance de matériels électroniques, recherche et test de prototype, enseignement en électronique et électrotechnique, industrie en électronique.

■ **Caractéristiques d'un compteur fréquencemètre** (*figure 10.35*)

Plage de fréquence des différentes entrées du Hz au GHz, mesures possibles (fréquence, période, ratio, salves, RPM, largeur d'impulsion, intervalle de temps, totalisateur, rapport cyclique, phase…), afficheur numérique 9 ou 10 chiffres, fonctions statistiques avancées, filtre passe-bas, filtre numérique, affichage des paramètres à l'écran, nombre de configurations et d'affichage à l'écran, maintien de la mesure, la cadence de mesure, interface GPIB ou RS232, logiciel d'édition de formes d'ondes sous Windows.

Figure 10.35 – Compteur fréquencemètre (Hameg).

■ **Choix d'un compteur**

Il est bien évident que le choix dépend toujours des conditions d'utilisation, sur le terrain, un compteur portatif est indispensable alors qu'en laboratoire un compteur de table sera plus approprié ensuite il faut le choisir suivant les fonctions et les valeurs des caractéristiques ci-dessus souhaitées.

10.6.4 Commutateur de wattmètre (*figures 10.36 et 10.37*)

Son objectif est de mesurer la puissance active en triphasé à l'aide de la méthode des deux wattmètres mais en n'en utilisant qu'un seul.
Caractéristiques : commutation sans rupture de ligne, commutateur rotatif 3 positions avec position centrale neutre, pouvoir de coupure 10 A cosφ = 0,3, appareil de classe II conforme à la norme EN 61010-1, niveau de protection 600 V cat. III.

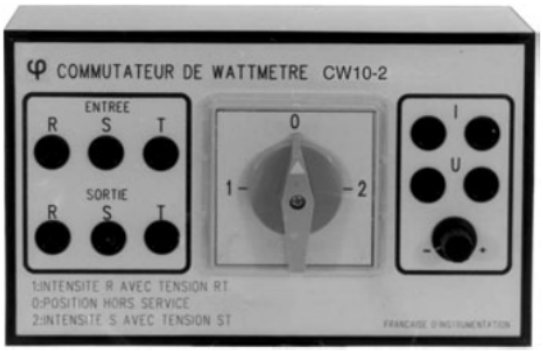


Figure 10.36 – Commutateur de wattmètre CW10-2.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

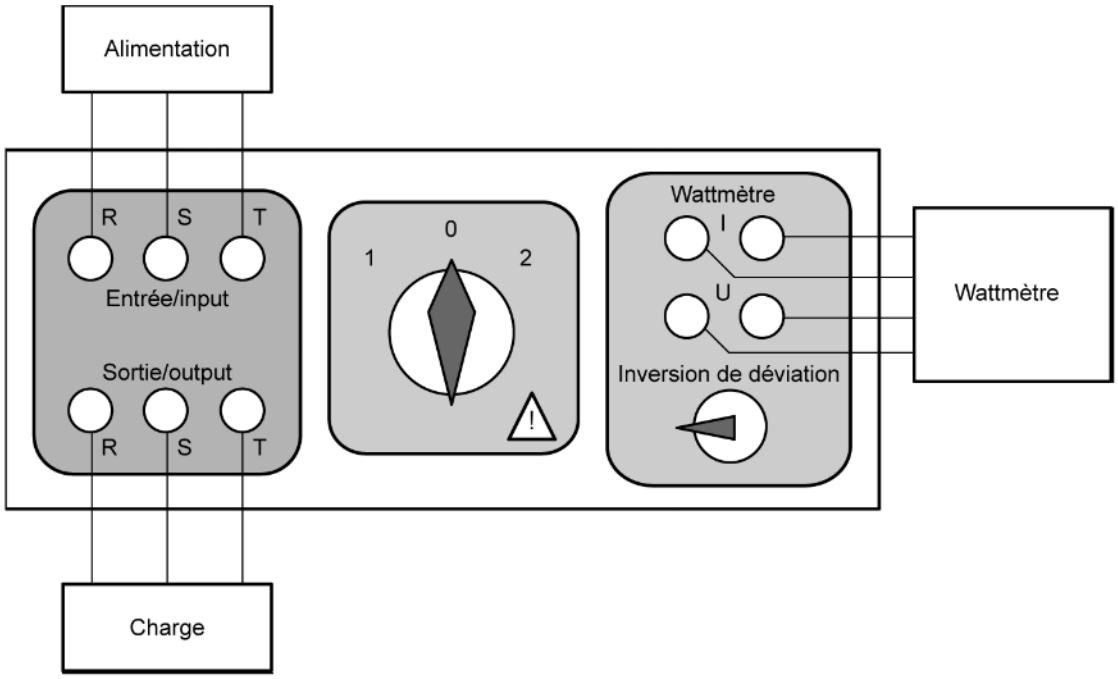


Figure 10.37 – Schéma de câblage d'un commutateur de wattmètre.

Figure 10.38 – Meuble métallique avec matériel de mesure incorporé : oscilloscope, multimètre, alimentation double continue, générateur de fonction (Biguet).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

10.6.5 Pont de mesures RLC

Son objectif est de mesurer les valeurs de capacité, de résistance et d'inductance d'une charge.

Il en existe deux types : portable ou de table.

Caractéristiques : mesure R/L/C, facteur de qualité Q et de dissipation D modèle série ou parallèle du composant, mesure en 2 fils ou en 4 fils, précision de basse, enregistrement dynamique des valeurs, mode relatif (différence), maintien de la mesure, fonction tri/tolérance (1, 5 ou 10 %).

10.6.6 Bancs de mesures pré-équipées (*figure 10.38*)

Leur objectif est d'offrir une table de mesure en électronique pré-équipée d'appareils de mesures intégrés (générateur basse fréquence, oscilloscope, ordinateur) en plus des alimentations alternatives et continues fournies en toute sécurité (disjoncteur différentiel 30 mA).

10.7 Matériels entrant dans la chaîne d'acquisition : liaison des données sans fil

10.7.1 Introduction à la liaison Bluetooth®

Le nom de la technologie Bluetooth® (« dent bleue ») doit son origine à un roi Viking du Xe siècle qui a réussi à unifier le Danemark par ses talents de communication.

Quelques dates :

1994 : Ericsson lance ses investigations sur une interface radio entre le téléphone mobile et ses accessoires.

1997 : invention du procédé Bluetooth® par Jaap Haartsen (scientifique d'origine danoise, docteur en génie électrique et diplômé de l'université de technologie de Delft aux Pays-Bas).

Février 1998 : création du **Special Interest Group** (SIG) Consortium chargé de standardiser et promouvoir une technologie sur la base des travaux de Jaap Haartsen. Chauvin Arnoux comprenant l'intérêt de cette nouvelle technologie s'associe très tôt à ce consortium.

La même année : Nokia, IBM, Toshiba et Intel se joignent à Ericsson pour standardiser et promouvoir cette technologie baptisée alors Bluetooth®.

1999 : les premières spécifications (versions 1) sont publiées.

10.7.2 Rappels sur cette technologie

À l'origine, c'était une simple puce suffisamment compacte pour s'intégrer dans tout appareil numérique et permettant une communication sans fil de portée restreinte. Aujourd'hui, **la technologie Bluetooth est une norme de réseau local de radiocommunication numérique**, utilisable sans redevance et sans licence dans la bande ISM (*Industrial Scientific Medical*) à 2,45 GHz. Cette bande de

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

fréquences a l'avantage d'être moins encombrée que la bande de transmission à 433 MHz.
La nouvelle technologie fonctionne ainsi par la technique de transmission d'étalement de spectre à sauts de fréquences rapides, qui procure une très grande immunité contre les perturbations externes d'ordre électromagnétique.
C'est une technologie basse consommation, qui trouve logiquement sa place, intégrée dans des équipements portables.
Elle emploie des algorithmes d'authentification et de cryptage de données assurant la sécurité et la confidentialité des données. Le débit net d'échange entre deux équipements peut atteindre 721 kbit/s.
La portée va au-delà de 100 m avec des antennes adaptées.

Tableau 10.4 – Classe de puissance et portée du Bluetooth®.

Classe de puissance (affaiblissement)		Portée
I	100 mW (20 dBm)	100 m
II	2,5 mW (4 dBm)	15-20 m
III	1 mW (0 dBm)	10 m

La technologie Bluetooth est normalisée par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), organisation de normalisation mondiale basée aux États-Unis (http://www.ieee.org) et utilisable partout dans le monde. En France, la législation est régie par l'ART (Autorité de régulation des télécommunications – http://www.art-telecom.fr).

Tableau 10.5 – Normes et débit des différents standards.

IEEEE 802.15.1	Standard Bluetooth 1.x	1 Mbit/s
IEEE 802.15.0.2	Standard recommandé pour Bluetooth et Wifi (en cours de validation)	2,4 GHz
IEEE 802.15.3	Standard « haut débit » pour le Bluetooth en cours de développement	20 Mbit/s
IEEE 802.15.4	Standard en développement pour des applications à « bas débit »	–

10.7.3 Une technologie innovante

De toutes nouvelles possibilités, jusqu'alors inimaginables avec les technologies existantes, sont désormais envisageables grâce à Bluetooth®.
La technologie sans fil permet en effet, d'abolir les contraintes techniques, économiques ou de délai d'installation en créant de nouveaux réseaux de communication entre les équipements industriels.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

C'était jusqu'alors inconcevable. Par exemple, la simple présence d'un fil de câble passant dans une zone humide ou dangereuse, pouvait entraîner des coûts d'installation souvent prohibitifs et des aménagements particuliers du site (gaines imperméables, protections…). Aujourd'hui, rien de plus simple que d'installer des équipements Bluetooth®.

Aucun contact direct avec la zone humide ou dangereuse n'est à déplorer. Autre exemple, l'installation d'équipements dans un espace sans visibilité directe.

La technologie Bluetooth® fonctionne dans la bande d'hyperfréquences et offre l'avantage de passer les obstacles, comme les cloisons et de réfléchir sur les surfaces métalliques.

Cela permet souvent l'installation d'instruments sans qu'ils soient en ligne de mire directe entre eux. **La technologie Bluetooth® permet également de connecter jusqu'à huit équipements simultanément**, constituant par là même, de véritables réseaux multipoints.

Les fonctionnalités de découverte, c'est-à-dire de recherche d'un autre équipement atteignable (en portée et compatible Bluetooth) et de reconnaissance de ses fonctionnalités, permettent de créer des liens instantanés entre des équipements sur le terrain.

L'appairage, processus par lequel on lie deux équipements par un lien de confiance sécurisé par l'échange des clefs secrètes, favorise ensuite la transmission des données entre les deux appareils ainsi « virtuellement » connectés.

Ce processus empêche à un équipement inconnu de se connecter et de monopoliser la ressource. À chaque mise sous tension ultérieure, les équipements se connectent directement.

La technologie Bluetooth® est maintenant éprouvée et fiabilisée, et sa très large diffusion assure des coûts, par produit, souvent inférieurs aux autres technologies radionumériques.

10.7.4 Des domaines d'applications variés

La technologie Bluetooth® ouvre la voie à de nombreuses applications industrielles, telles que le remplacement des câbles entre équipements industriels et ordinateurs, la communication avec des terminaux portables ou encore, la création de réseaux de capteurs et d'automates déportés.

Les applications possibles sont multiples, beaucoup plus larges qu'initialement prévues : dans l'informatique nomade, l'électronique grand public, le médical, l'instrumentation et même désormais dans l'industrie.

En voici quelques exemples : passage de câble difficile ou impossible, machines tournantes, process en mouvement – ponts élévateurs – grues, zones fortement perturbées par pollution électromagnétique, laboratoires, hôpitaux, centrales d'épuration, mesures nomades.

Les besoins émergents concernent aussi bien le remplacement des installations existantes que la réalisation de nouvelles installations à moindre coût. L'installation des équipements est relativement aisée dans les cas simples.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

En fonction de l'application, il peut cependant être nécessaire de procéder à un audit sur site pour percevoir l'influence de l'environnement et évaluer le nombre d'équipements Bluetooth® nécessaires pour couvrir une zone donnée, et ainsi définir les meilleurs emplacements pour les équipements.

Les industries de process exigeantes attendaient la solution éprouvée : réaliser un réseau local sans fil assurant une transmission fiable et sécurisée des données.

Avec le Bluetop 100®, modem radio qui utilise la technologie de communication sans fil Bluetooth® développé par Pyro-Contrôle, c'est chose faite.

Le Bluetop 100® est conçu pour travailler dans un environnement industriel, en liaison point par point. Il remplace les liaisons filaires RS485 ou RS232 sur une longueur de 100 mètres ou plus. Cette solution présente de multiples avantages par rapport aux versions câblées traditionnelles.

Le premier est de **diminuer les coûts de câblage** dans des environnements industriels sévères ou sensibles. En effet, dans de tels contextes, les coûts d'installation et de maintenance d'un réseau câblé RS485 s'avèrent de plus en plus élevés, pour des raisons aussi bien techniques que de sécurité.

En second lieu, le Bluetop 100® assure une **transmission fiable et sécurisée** des données.

Il utilise la technologie de radiocommunication numérique FHSS, dite « spectre étalé à sauts de fréquences rapides » fonctionnant à 2,45 GHz, reconnue pour sa sécurité et son immunité aux perturbations électromagnétiques.

Grâce à cette technologie sans fil, les passages de câbles difficiles et les problèmes de connexions mécaniques sont résolus dans les environnements mobiles tels les ponts roulants, les fours tournants, etc.

La distance de transmission est modulable selon le choix de l'antenne. Avec l'antenne interne, la portée est de dix mètres, cent mètres avec l'antenne omnidirectionnelle, et la transmission atteint un kilomètre avec l'antenne directive.

Le Bluetop 100® est un produit *plug and play*, son installation est rapide et sa mise en œuvre particulièrement simple. À la mise en route, le temps de connexion typique entre deux modems est de 1 seconde.

Il se monte sur rail DIN et s'alimente sur le secteur 230 V, avec une consommation inférieure à 2 VA.

Pour répondre au mieux aux différentes demandes, deux conditionnements sont proposés : un seul modem Bluetop 100® à configurer, ou deux modems Bluetop 100® déjà « appairés » immédiatement fonctionnels.

Ce produit est livré avec son logiciel de configuration PC (français et anglais) pour s'adapter à son environnement : appairage de deux produits, encryptage des données, etc.

Ouverte et résolument communicante, la technologie Bluetooth® garantit « l'interopérabilité » du Bluetop 100® avec les modules Bluetooth® des autres fabricants.

De plus, le Bluetop 100® est compatible avec les protocoles industriels courants et notamment Modbus/Jbus. Il bénéficie en plus d'une conception évolutive et ouverte pour prendre en compte les besoins à venir : applications multipoints, évolution de la norme Bluetooth®, applications OEM (*figure 10.39*)…

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 10.39 – Bluetop 100® avec ses modules Bluetooth® (Chauvin Arnoux).

WLAN (*Wireless LAN*) et sa déclinaison Wi-Fi sont une alternative aux réseaux câblés de type Ethernet ou fibre optique. WLAN utilise la même bande ISM que la technologie Bluetooth®. Plusieurs techniques de transmission sont ainsi possibles, la plus courante est l'étalement de spectres par séquence directe. Avec cette technique, les WLAN arrivent à des vitesses de communication de 11 et 54 Mbits/s (certains même à 108 Mbits/s). La portée à ces vitesses est de quelques dizaines de mètres. À des vitesses plus basses (1 à 2 Mbits/s), le WLAN peut atteindre 100 mètres. La contrepartie à ce débit élevé est une moindre robustesse et fiabilité par rapport à la technologie Bluetooth®.

En effet, les réseaux WLAN sont plus facilement perturbés par des interférences externes. Les WLAN étant plus complexes que Bluetooth, car dotés de fonctionnalités telles que le *roaming* (changement dynamique de cellules), sont également plus chers à mettre en œuvre. Ils consomment plus d'énergie et leur implantation dans les équipements requiert plus d'espace (volume) que pour la technologie Bluetooth®. Cette complexité se paye aussi au niveau du prix des équipements qui, à fonctionnalités égales, sont plus chers que les équipements Bluetooth®.

Ce surcroît est le plus souvent inutile dans le cas d'une communication entre des équipements industriels, qui ont rarement besoin de communiquer à des vitesses si élevées (le plus souvent limitées à 115,2 kbits/s).

Pour conclure, les WLAN et Bluetooth ne sont pas réellement des concurrents, car ils répondent à des besoins bien distincts : WLAN permet d'étendre le réseau informatique câblé classique par des points d'accès sans fils. Bluetooth® permet de créer des réseaux locaux sans fils entre équipements portables ou industriels.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 10.6 – Comparatif des quatre technologies principales.

	Bluetooth 1.1 IEEE 802. 15. 1 pour les couches basses	Wi-Fi IEEE 802. 11g	433 MHz IETS 300-220	Zigbee IETS 300-220
Bande de fréquence	2,4 GHz	2,4 GHz	433 MHz	2,4 GHz et 866/915 MHz
Technique de codage	FHSS (sauts de fréquence)	OFDM (multiplexage par division de fréquence)	FSK	DSSS (étalement de spectre)
Débit net maximal théorique (1)	723 kbits/s	54 Mbits/s (11 Mbits/s pour 802. 11b)	38,4 kbits/s	255 kbits/s
Portée maximale théorique (2)	100 m	100 m	500 m	100 m
Compatibilité	Bluetooth V1.2	802. 11.b (Ethernet sans fil)		
Coût	Réduit	Moyen	Faible	?
Sécurité	Excellente	Bonne	Mauvaise	?
Qualité de service (3)	Excellente	Moyenne	Mauvaise	Bonne
Latence (4)	Très faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Consommation électrique (5)	Faible	Moyenne	Très faible	Très faible
Technologie mature	Oui	Oui	Oui	Non
Applications	Communications intra-machines et inter-machines de production (support voix et données)	Réseaux locaux industriels	Alarme, ouverture de porte, transmission de données	Supervision et contrôle industriel

(1) En mode point à point. (2) En champ libre. (3) Intégrité des données. (4) Retard de transmission. (5) Dépend de la portée et de la latence.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

10.7.5 Conclusion

La technologie Bluetooth® répond parfaitement aux exigences du monde industriel et aux contraintes des appareils de mesure : maturité, fiabilité, portée, débit correct, faible consommation et coûts peu élevés.
Dans le domaine des PC portable ou de bureau, la multiplication des extensions et des périphériques (imprimantes, webcam, disques durs extérieurs, lecteurs de cartes mémoires, modem ADSL, appareil photo numérique, clavier, souris, PDA, téléphone portable/appareil photo…) a aussi multiplié les câbles de liaisons.
Pour pouvoir raccorder ces divers appareils et accessoires, il a été créé une nouvelle interface : l'USB.
Cette interface présente les avantages suivants :

– possibilité de multiplier les prises USB grâce à un ou des boîtiers nommés *hub* ;
– possibilité de connecter ou déconnecter « à chaud » les appareils ou accessoires ;
– reconnaissance le plus souvent automatique des accessoires (*plug and play*).

Mais ce système ne supprime pas les nombreux câbles de raccordement nécessaires. C'est la raison pour laquelle on trouve de plus en plus d'accessoires à liaison sans fil Bluetooth®.
D'autre part, les PC actuels ne sont plus équipés des liaisons série RS232, parallèle Centronic et n'ont plus de lecteur de disquettes, ce qui impose pour utiliser le matériel existant, le raccordement d'adaptateurs ou de lecteurs externes.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

11 • MESURE DE LA TEMPÉRATURE

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3°) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'élément sensible, dans le cadre d'une mesure de la température, est l'élément actif du capteur. Il est appelé jonction de mesure dans le cas des capteurs thermoélectriques et résistance dans le cas des capteurs à résistance thermométrique.
La tension délivrée ou la valeur de la résistance, selon le type d'élément sensible, dépend de la température à laquelle cet élément est porté.
Dans tous les cas, l'indication de température donnée est la température atteinte par l'élément sensible.
La chaîne de mesure de température est toujours composée d'une sonde (conçue pour favoriser le transfert thermique entre le capteur et le milieu tout en protégeant celui-ci des contraintes mécaniques, chimiques et électriques susceptibles de le détériorer), d'un capteur de température (Pt100, thermistance, thermocouples, capteur infrarouge) et de l'appareil de mesure pour l'acquisition et la lecture de l'information.
Les différents capteurs sont ainsi décrits au sein de ce chapitre.

11.1 Capteurs à variation de résistance

Ces capteurs se composent d'un conducteur métallique dont la résistance varie avec la température. C'est la valeur de cette résistance qui fournit le signal de mesure. Généralement la résistance de ce capteur se retrouve incluse dans un pont de Wien ou parcourue par un courant constant.
Il existe deux grandes familles :

– les thermistances (variation de la résistance non linéaire) ;
– les Pt100 (variation linéaire, sonde au platine 100 Ω à 0 °C).

11.1.1 Thermistances

■ Principe des CTP et CTN

Les thermistances sont des résistances dont la valeur ohmique à dissipation nulle (sans passage de courant) diminue (CTN) ou augmente (CTP) en fonction de l'augmentation de la température (*figures 11.1 et 11.3*).
La variation de la température est obtenue par :

– le passage d'un courant dans l'élément ;
– la variation de la température ambiante ;
– la combinaison des deux grandeurs précédentes.

■ Variation de la résistance à coefficient de température négatif CTN (*figure 11.2*)

La variation du coefficient de température n'est pas linéaire. La valeur de la résistance dépend d'un coefficient appelé B.

□ Applications CTN

– Limiteur d'appel de courant.
– Compensation de température des circuits à transistors.
– Mesure et contrôle de température.

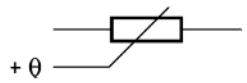


Figure 11.1 – Symbole d'une CTN.

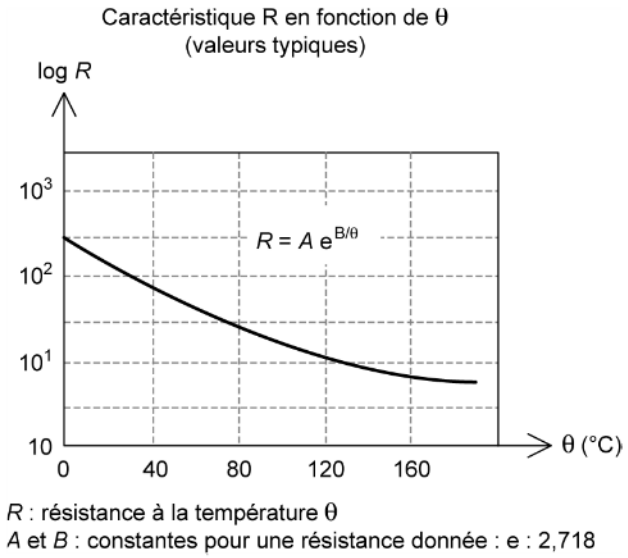


Figure 11.2 – Caractéristique d'une sonde de type CTN (résistance en fonction de la température).

□ Conseils d'utilisation

Attention ! Ne pas connecter plusieurs CTN en parallèle pour obtenir une dissipation plus importante car une CTN peut rester froide et l'autre s'échauffer excessivement.
Ne pas immerger une CTN non protégée dans des fluides conducteurs ou corrosifs ou des gaz réducteurs car cela modifierait les caractéristiques de celle-ci.

■ Variation de la résistance à coefficient de température positif CTP (*figure 11.4*)

En général, pour les valeurs basses de températures, les CTP ont un coefficient de température nul ou négatif. En se déplaçant vers de plus hautes températures, ce coefficient devient positif et de valeur très élevée jusqu'à 150 °C environ. Au-dessus de cette température, le coefficient décroît et devint négatif.

□ Applications CTP

– Mesure et contrôle de température.
– Protection de ligne (surtensions et courts-circuits).
– Stabilisation du courant dans les postes téléphoniques.
– Contrôle de température des moteurs électriques.

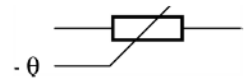


Figure 11.3 – Symbole d'une CTP.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

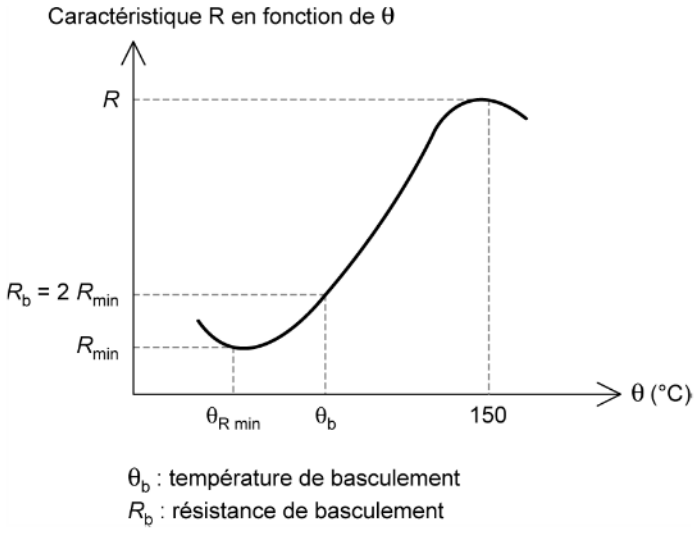


Figure 11.4 – Caractéristique d'une sonde de type CTP (résistance en fonction de la température).

☐ Conseils d'utilisation

Attention ! Ne pas utiliser de CTP en série afin d'utiliser de plus haute tension, ceci conduit à la destruction de la CTP qui s'échauffera le plus.
Ne pas appliquer une tension supérieure à V_{max} à une CTP car ceci peut amener la destruction de celle-ci.

☐ Domaine d'utilisation

La CTP est principalement utilisée en agroalimentaire. La plage de mesure, comprise entre – 40 °C et +150 °C, correspond aux applications et la précision demandée soit : de ± 0,5 °C entre – 20 °C et + 30 °C, résolution 0,1 °C en moyenne.

☐ Appareillages Comark

KM21 : étendue de mesure – 40 °C à + 110 °C, résolution 0,1 °C, précision ± 0,5 °C entre 0 °C et + 70 °C.
KM22 : double capteur offre la précision avec la thermistance et la rapidité avec le thermocouple T.
Les sondes adaptables peuvent être de différentes formes suivant les produits à contrôler (*figure 11.5*) : sonde de surface, de pénétration, sonde recourbée pour friteuse, sonde spéciale pour le lait, sonde à immersion tous liquides…

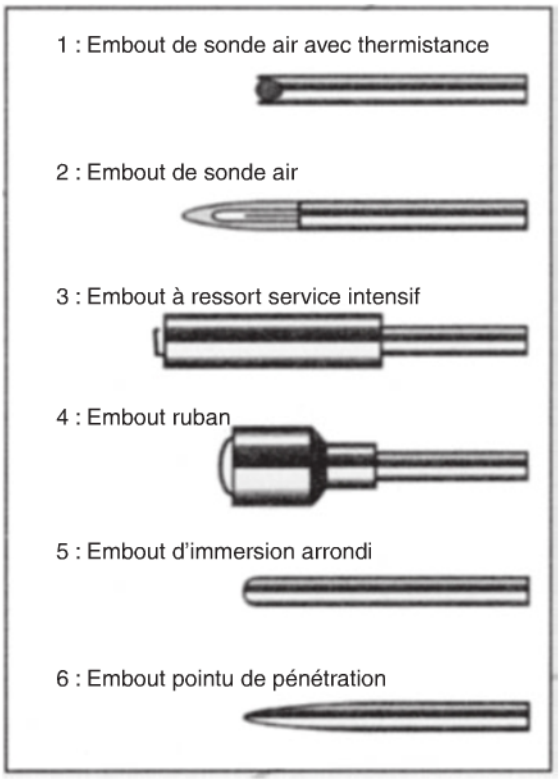


Figure 11.5 – Différents embouts de sonde.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

11.1.2 Capteurs résistifs thermométriques

■ Principe physique et présentation

Un certain nombre de métaux purs présentent un coefficient de résistivité dont la variation en fonction de la température est monotone et reproductible. Ils sont utilisés comme capteurs de température.
Les métaux généralement employés sont le platine et le cuivre (le nickel n'est pratiquement plus utilisé).
Actuellement, l'élément en platine présentant une résistance de 100 Ω à 0 °C est le plus répandu. L'élément cuivre qui offre l'avantage d'une courbe $R = f(\Omega)$ pratiquement linéaire est encore parfois préféré malgré son encombrement et son domaine d'emploi limité en température.

■ Résistance thermométrique

Le platine pur a une résistance électrique qui varie en fonction de la température. Cette loi s'exprime sous la forme : $R = R_0\ (1 + A.t + B.t^2)$.
Mesurer une résistance d'un fil de platine est donc un moyen de connaître sa température, par conséquent la température du milieu qui l'environne.
En pratique, la plupart des résistances thermométriques de platine sont fabriquées pour avoir une résistance de 100 Ω à 0 °C ; d'où le nom de Pt100.
La norme CEI 751 définit les relations caractéristiques température/résistance que doivent respecter les composants.
Elle définit aussi un domaine d'application entre – 200 °C à + 850 °C. Mais dans la pratique les conditions sont très souvent inférieures à 450 °C. Au-delà, des précautions particulières doivent être respectées de façon à ne pas polluer les filaments de platine.

□ Classe d'interchangeabilité

Les résistances thermométriques doivent respecter un écart maximum par rapport à la norme (*figure 11.6*) :

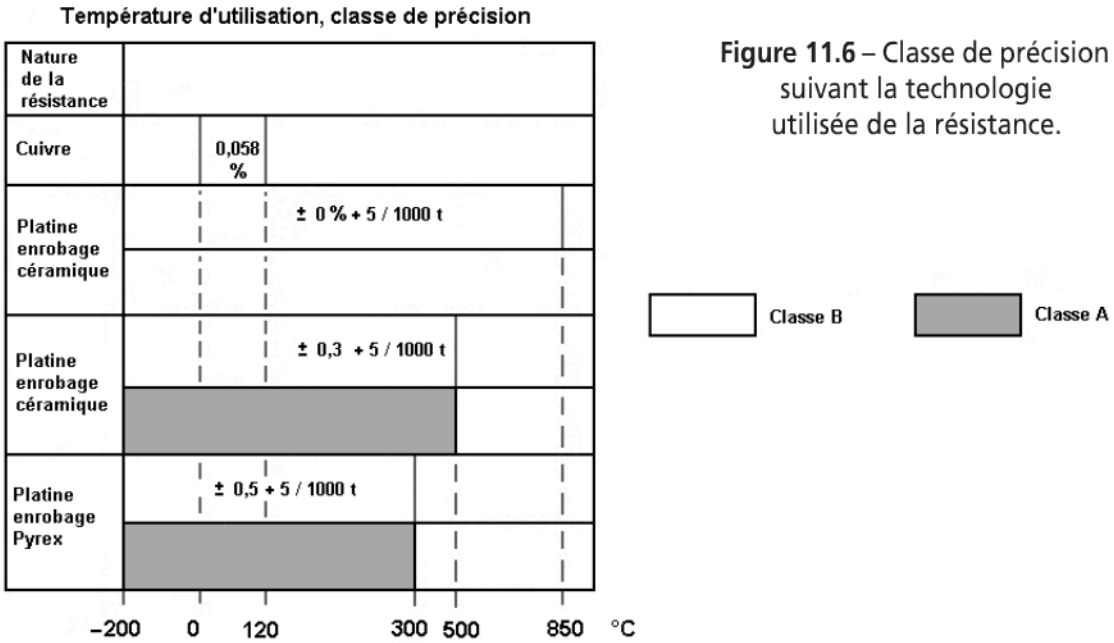


Figure 11.6 – Classe de précision suivant la technologie utilisée de la résistance.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Classe A : écart maximum de 0,15 °C + 0,002 T (T est la température mesurée).
– Classe B : écart maximum de 0,3 °C + 0,005 T (T est la température mesurée).

□ Technologie

Deux technologies sont actuellement employées :

– Dans la première, un filament platine est enroulé autour d'un noyau en matériau céramique et est assemblé à l'intérieur d'un corps cylindrique lui aussi en céramique. Les dimensions externes vont du diamètre 1 à 4,5 mm pour des longueurs de 10 à 40 mm.
– Dans la seconde, un film de platine est déposé sur un substrat céramique avec la technique des dépôts sous vide. Les épaisseurs sont de l'ordre de 1 mm, pour la longueur et une largeur de l'ordre de 2 × 8 mm.

□ Précision

Même si le temps de réaction est supérieur à celui des thermocouples, les Pt100 sont très précises et moins sujettes aux dérives.

□ Raccordement

Pour mesurer la résistance des Pt100, il faut connecter un moyen de mesure très sensible car les variations de résistance sont faibles (40 mA pour 0,1 °C).
Il existe trois types de branchement :

– 2 fils : dans la pratique on évite le branchement 2 fils car il déclasse le capteur ;
– 3 fils : mesure par pont de Wheatstone (voir ci-dessous) ;
– 4 fils : deux fils pour la mesure de la tension, deux fils pour la mesure du courant.

□ Montage 3 fils

À l'équilibre du pont pour $U = 0$:

$$R_1(RL_1 + R_m) = R_3(RL_2 + R_2)$$

Si $R_1 = R_3$:

$$(RL_1 + R_m) = (RL_2 + R_2) \text{ avec } RL_1 = RL_2$$

L'erreur engendrée par la résistance des fils de connexion s'annule (*figure 11.7*).
U est directement proportionnelle à la valeur de R_m donc à la température à mesurer.

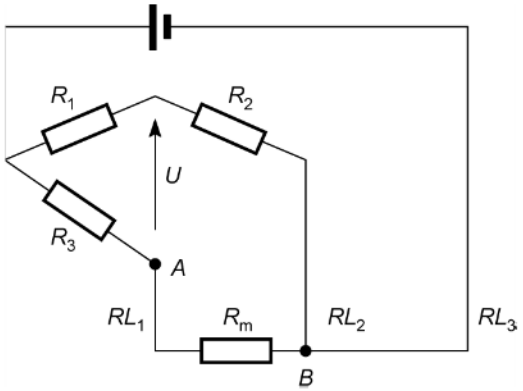


Figure 11.7 – Montage 3 fils.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

La résistance d'isolement entre chaque sortie et la gaine métallique extérieure du capteur doit être supérieure à 10 MΩ pour une température d'emploi entre 100 et 300 °C (*figure 11.8*).

Figure 11.8 – Vérification de la température d'un moteur électrique.

□ Applications des Pt100

- Agroalimentaire avec une étendue plus vaste de mesure : – 100 °C à + 200 °C, résolution de 0,1 °C, précision de ± 0,2 % en moyenne.
- Enseignement (régulation de température).
- Génie climatique (régulation de température).
- Industries de transformations (cuisson).

■ Capteurs Pt100 (*figure 11.9*)

On dénombre trois types de Pt100 :

- capteurs Pt100 Ω d'usage général de 0 °C à + 200 °C classe B, montage 3 fils, protection par tube en acier inoxydable ;
- capteurs Pt100 Ω pour applications exigeantes dans des environnements sévères de – 200 °C à 450 °C, classe A, montage 3 ou 4 fils ;

Figure 11.9 – Pt100 spécifiques pour des hautes pressions.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– capteurs Pt100 Ω pour applications particulières : plates pour relever la température de surface, à poignée pour une prise manuelle, avec gaine et câble pour les autoclaves afin de protéger contre l'humidité, gaine en verre pour les mesures dans l'acide, à pique pour l'agroalimentaire.

■ **Appareil de mesure** (*figure 11.10*)

Le thermomètre à sonde platine Chauvin Arnoux C.A 865 offre une excellente précision, sur une plage de mesure comprise entre – 50 °C à + 200 °C. Son afficheur numérique 20 000 points est doté d'un rétro-éclairage, de nombreux capteurs Pt100 pour usages spécifiques sont disponibles en option.
Il est équipé des fonctions Max, Hold et affichage en °C ou °F. Ses caractéristiques :

– Précision de ± 0,5 °C, résolution de 0,1 °C, temps de réponse 400 ms.
– Excellente précision, nombreux capteurs spécialisés couvrant la température de – 200 °C à + 850 °C, précision typique de ± 0,25 %.

Le thermomètre numérique 505 RTD pour résistance platine 100 Ω offre les avantages suivants :

– Excellente précision 0,05 %.
– Mesure de température entre – 200 °C à + 800 °C, résolution de 0,1 °C.
– Précision typique de ± 0,25 %.
– Raccordement du capteur 3 fils avec un adaptateur capable de faire de la mesure différentielle grâce à ses deux voies, on peut programmer deux seuils d'alarme en cas de dépassement, choix de l'unité °C ou °F, mesures relatives avec programmation de la référence, enregistrement des valeurs maximales/minimales et moyennes avec indication horaire, etc.

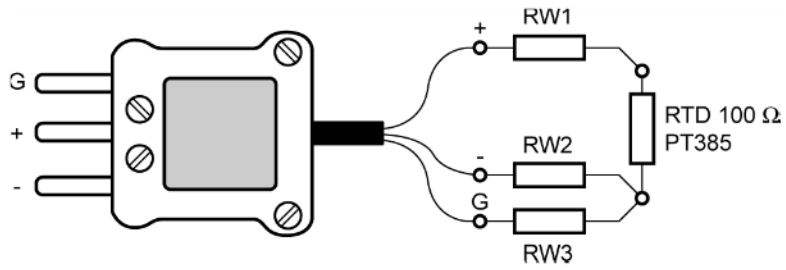


Figure 11.10 – Schéma de raccordement de la sonde Pt100 avec son adaptateur.

11.2 Capteurs thermocouples

11.2.1 Généralités

La mesure de température par couple thermoélectrique peut être assimilée à une mesure différentielle.
En effet, un couple est constitué de deux fils de métaux ou d'alliages différents soudés à leurs extrémités. Lorsque l'on chauffe ou refroidit l'une des soudures (jonction de mesure), une force électromotrice prend naissance dans la jonction, un courant circule alors dans la boucle (effet Seebeck, *figure 11.11*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Un milliampèremètre placé dans la boucle permet donc de mesurer le courant et d'en déduire la température mesurée en connaissant :

– la température de la soudure libre (jonction de référence) ;
– la loi de variation température/force électromotrice ;
– la résistance de la boucle de mesure.

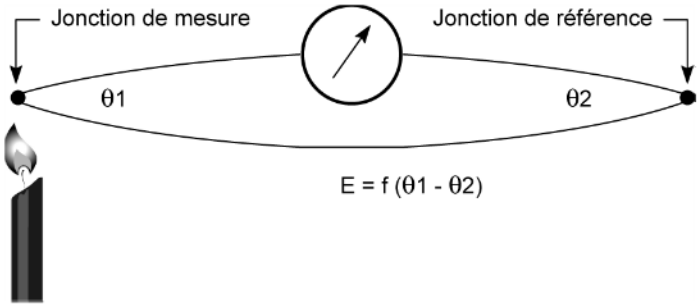


Figure 11.11 – Schématisation de l'effet Seebeck.

Si on ouvre la boucle (par exemple côté soudure de référence), il apparaît une f.e.m. Cette f.e.m. est fonction de la différence des deux températures, le courant résultant dépend de la résistance des jonctions et des conducteurs.

11.2.2 Correction de jonction de référence

Pour que la f.e.m. soit à l'image de la température réellement mesurée, il faut donc tenir compte de la température de jonction de référence. Celle-ci est normalisée à 0 °C (soudure froide).

Cette jonction est généralement reportée, pour des raisons de commodité, aux bornes de l'appareil de mesure, par l'intermédiaire de **câbles de compensation** (*figure 11.12*) de même nature thermoélectrique que le couple thermoélectrique lui-même.

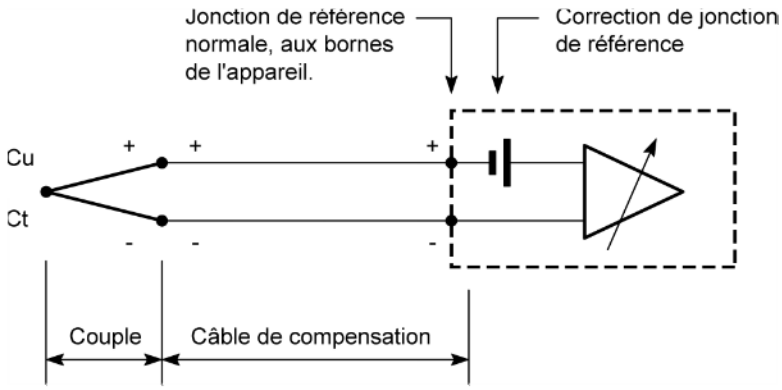


Figure 11.12 – Utilisation de câble de compensation.

Dans certains cas, pour des raisons pratiques, il est nécessaire d'éloigner l'entrée mesure du capteur (jonction de référence déportée). La correction est assurée par mesure de la température de jonction de référence et création d'une tension

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

proportionnelle ajoutée à la f.e.m. du couple thermoélectrique ramenant à 0 °C la référence.

De même que dans un appareil électronique, en raison de l'auto-échauffement, la température à ses bornes est différente de la température ambiante (un indicateur numérique par exemple), la correction de jonction de référence sera donc réalisée par mesure de la température des bornes et création d'une tension proportionnelle qui sera ajoutée, dans le sens convenable, à la f.e.m. fournie par le couple. Cette correction peut être réalisée à l'aide d'un couple, d'une diode, etc.

11.2.3 Linéarisation

La relation température/f.e.m. n'est pas linéaire, sa loi varie d'un type de couple à l'autre. Or, dans la conversion analogique/numérique, on recherche la meilleure linéarité possible. Il en résulte que pour afficher sur l'indicateur une température et non une f.e.m., il faut également introduire des éléments de correction qui auront pour objet de modifier la pente de conversion en un certain nombre de points dépendants de la nature du couple et de l'étendue de mesure. Cette correction de non linéarité (linéarisation) peut être réalisée de façon numérique, analogique ou analogique et numérique.

11.2.4 Précision et fidélité

De ce qui précède, il apparaît que la précision de l'ensemble de mesure dépendra en premier lieu du choix du capteur.

Les normes NFC 42321/22/23 et 24 définissent :

– les couples normalisés ;
– les lois de traduction ;
– les tolérances ;
– les câbles de compensation et d'extension.

Avec un couple nickel chrome/nickel allié par exemple, ces limites sont :

– ± 3 °C de 0 à 400 °C ;
– ± 0,75 % de + 400 à + 1 100 °C.

Pour obtenir des résultats précis, il faut donc utiliser des couples étalons ou étalonnés.

Heureusement, dans les applications industrielles courantes, la constance dans la qualité d'un produit dépend le plus souvent de la reproductibilité des conditions de fabrication, ainsi que de l'exactitude de ces conditions par rapport à des données théoriques.

C'est ainsi qu'une erreur de plusieurs degrés sur la valeur théorique de la température est presque toujours sans importance, alors qu'un écart de 1 °C, voire de 1/10 °C sur la valeur pratique définie par expérience, peut rendre le produit inutilisable.

C'est donc la fidélité de la mesure qui, dans ce cas, est en cause.

Les couples thermoélectriques vieillissent assez rapidement (migration des métaux à la soudure chaude), il est donc nécessaire d'en vérifier l'étalonnage fréquemment.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 11.1 – Couples thermoélectriques normalisés.

Désignation internationale	Matériaux conducteurs	Échelle de température	Code couleur
K	Ni-Cr (+) Ni-Al (–)	0 à 1100 °C	Violet
T	Cu (+) Cu-Ni (–)	– 185 à + 300 °C	Bleu
J	Fe (+) Cu-Ni (–)	– 20 à + 700 °C	Noir
E	Ni-Cr (+) Cu-Ni (–)	0 à + 800 °C	Orange
R	Pt 13 % Rh(+) Pt (–)	0 à + 1600 °C	Vert clair
S	Pt 10 % Rh(+) Pt (–)	0 à + 1650 °C	Vert
B	Pt 30 % Rh(+) Pt 6 % Rh(–)	+ 100 à + 1600 °C + 1750 °C	Gris
N	Nlsil (+) Nlcrosil (–)	– 200 à + 1100 °C	Orange (ANSI 96-1)

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

11.2.5 Aspect mécanique des capteurs

La jonction de mesure (soudure chaude) peut être soit isolée soit à la masse.
Jonction isolée :

– Avantage : protection par rapport à la masse, isolement élevé.
– Inconvénient : temps de réponse lent (+ 20 à 50 %).

Jonction à la masse :

– Avantage : temps de réponse rapide, sécurité électrique.
– Inconvénient : sensible aux réjections de courants parasites.

11.2.6 Sorties de capteurs

– Directement par les fils du couple ou sur connecteur thermocompensé.
– Directement dans une tête de protection labo, industrie, etc. (tête de jonction).
– D'un convertisseur de mesure incorporé à la tête, dans ce cas la liaison peut continuer en fils de cuivre (sortie 4 à 20 mA, 0 à 10 V…).

11.2.7 Méthodologie de montage *(figure 11.13)*

La tête ne doit pas être portée à une température trop élevée, θ ≤ 100 °C.

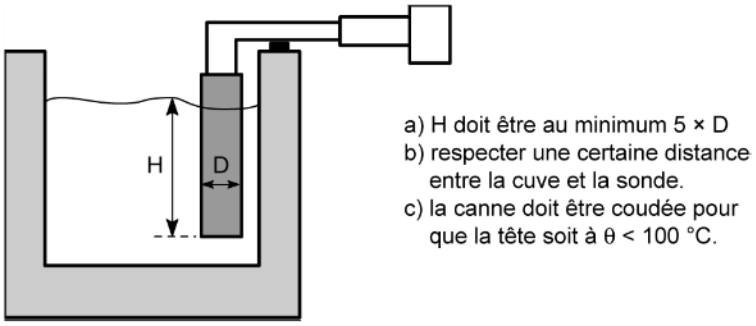
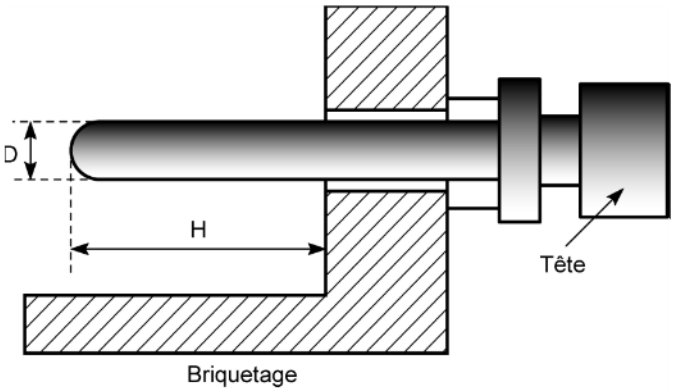


Figure 11.13 – Deux types de montages possibles.



a) H ≥ 5 × D
b) le capteur ne doit pas reposer sur le briquetage.
c) la tête est déportée, θ ≤ 100 °C.

■ Applications standard

- Génie climatique : contrôle des températures de locaux, chauffages.
- Industries agroalimentaires et chaîne du froid : contrôle des cuissons, de la congélation.
- Grand public : contrôle des appareils électroménager, réfrigérateur, fours, tables de cuisson, machines à laver, etc.
- Installateurs et artisans électriciens.
- Enseignement : lycée technique et centres de formation professionnelle.
- Laboratoires : contrôle de température d'un four, d'une étuve…
- Industries de transformation en général.

■ Applications spécifiques

- Chimie et pétrochimie : ces secteurs ont des exigences de sécurité très sévères. La fabrication des doigts de gant en inox, nickel ou revêtement de tantale est courante.
- Métallurgie, fonderie et sidérurgie : ces industries ont des niveaux de mesures de température très élevés et demande une adaptation de chaque capteur en utilisant des protections spéciales acier inox, réfractaires, céramique, composite ou alumine pure.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Industries du verre et de la céramique : les cannes de voûte et de sol pour four en fusion, les cannes pyrotechniques 3 ou 5 points sont gainées de platine rhodié pour feeder.
– Producteurs d'énergie : les sondes type K1 équipent les réacteurs de centrale nucléaire. Dans des chaudières et centrales thermiques traditionnelles, les cannes à aspiration mesurent au cours de la flamme des températures jusqu'à 1700 °C.
– Pharmacie et agroalimentaire : les capteurs doivent résister à la pression et à l'humidité dans des stérilisateurs et les autoclaves mais être compatibles avec les normes d'hygiène alimentaire.
– Automobile, ferroviaire, aéronautique et spatial : les conditions extrêmes de fonctionnement comme les vibrations imposent des adaptations sur le plan mécanique des capteurs utilisés.
– Industrie des semi-conducteurs : pour cette industrie high-tech, les spikes et thermocouples multipoint doivent présenter une extrême pureté. Lors des process de fabrication des wafers, les diffusions de dopage P et N et les oxydations du substrat ne tolèrent pas la moindre contamination.

11.2.8 Capteurs thermocouples

On dénombre différentes catégories de thermocouples.

■ Thermocouples chemisés standard

Capteurs déformables pour application diverses, il existe les thermocouples T, J, E, K, N, S, R ou B, ils sont isolés par des poudres compactées et chemisés par une gaine métallique (inox, alliages de base nickel ou encore métaux précieux). Ces capteurs déformables se prêtent à de multiples applications jusqu'à 1200 °C.

■ Thermocouples simples à usage général

Température < 400 °C. Couples J, SCM.
Thermocouples pour les industries du plastique et du caoutchouc : couple L, J montée sur baïonnette double encoche, montée sur ressort.

■ Thermocouples pour applications industrielles

Jusqu'aux hautes températures (1600 °C et plus) et pour les environnements sévères. Thermocouples de type T, J, K, N, R, S, B, W5, W3 gainés ou emperlés. Ils sont assemblés avec les éléments nécessaires et compatibles avec le milieu mesuré (IP 54 à IP 67).

■ Thermocouples pour applications particulières

Plats pour relever la température de surface, à poignée pour une prise manuelle, avec gaine et câble pour les autoclaves afin de protéger contre l'humidité, gaine en verre pour les mesures dans l'acide, à pique pour l'agroalimentaire, thermomètre à embout très résistant en carbure de tungstène pour des milieux abrasifs.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Accessoires pour thermocouples

Câbles d'extension et de compensation : ils permettent la prolongation du thermocouple jusqu'à la boucle d'instrumentation : simple ou multipaires disponibles dans tous les types de thermocouples.
Connecteurs à contacts compensés pour thermocouples en version standard ou miniature.
Accessoires pour la maintenance des thermocouples : protecteurs, fixation, gaine…
1 ou 2 voies de mesures en couple K, nombreux capteurs de température entre – 50 °C et + 1300 °C, précision typique de ± 3 %.
Fonction mémoire en valeur maximale. Sortie analogique pour l'enregistrement.
C.A 861 : 1 voie de mesure pour thermocouple K, résolution 0,1 et 1 °C.
C.A 863 (*figure 11.14*) : 2 voies pour thermocouple K – différence de température, résolution 1 °C.
C.A 865 : 2 voies pour Pt100 – différence de température, résolution 0,5 °C.

Figure 11.14 – Thermomètre numérique C.A 863.

Figure 11.15 – Adaptateur de température C.A 803.

C.A 801/C.A 803 (*figure 11.15*) : adaptateur de température qui transforme un multimètre classique en thermomètre avec thermocouple type k – 40 °C à 1000 °C, une sortie linéarisée 1 mV/°C, un mode différentiel (T1-T2) pour le C.A 803.
Compatible avec la gamme de multimètre C.A 5200.
Transformer le C.A 5205G en thermomètre lecture directe 1 mV = 1 °C.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ **Conseils d'utilisation des capteurs thermocouples**

Pour effectuer une bonne mesure, il faut savoir qu'un capteur de température ne donne jamais la température du milieu X mais sa propre température.
Pour connaître la température du milieu X, il faut que le capteur soit en équilibre thermique avec se milieu.

□ **Capteur + sonde pénétrant dans un milieu**

– Il faut que l'extrémité du capteur (soudure chaude) pénètre au moins de 10 fois le diamètre du capteur dans le milieu.
– La dimension du capteur doit être faible devant le volume du produit dont on désire connaître la température.

□ **Capteur + sonde pour mesure de la température de l'air**

– Ne pas mettre la main sur la partie active du capteur.
– Si l'air ou le gaz est en mouvement, pas de problème. Par contre si l'air est dit immobile (température des locaux), agiter le capteur pendant 10 à 20 secondes avant de faire la mesure.

□ **Capteur + sonde pour mesure de température de surface**

– La température mesurée est toujours inférieure à la température réelle de la surface.
– L'état de la surface de la pièce à mesurer doit être bon. Pour améliorer l'échange, enduire la surface du capteur de graisse (silicone jusqu'à 260 °C).
– Bien plaquer le capteur sur la surface.

11.3 Sonde infrarouge avec et sans émissivité réglable

11.3.1 Présentation générale

Les thermomètres infrarouges représentent la meilleure solution pour la mesure de température lorsqu'il est très difficile de rentrer en contact avec la cible comme les thermomètres classiques.
Tout corps émet un rayonnement électromagnétique dont le spectre continu à une répartition énergétique fonction de la température.
En dessous de 500 °C, le rayonnement thermique se situe dans le domaine de l'infrarouge et l'absorption du rayonnement par le milieu ambiant pendant son trajet entre la cible et le détecteur est en moyenne plus faible dans cette fenêtre.
Les thermomètres infrarouges mesurent la température de la surface d'une cible en détectant l'énergie transmise (négligeable). Seul le rayonnement thermique émis est intéressant, c'est à partir de sa mesure que l'on peut déterminer la valeur de la température de la surface de la cible.
Pour prendre en compte uniquement le rayonnement thermique émis, on corrige le résultat par un coefficient d'émissivité propre à la cible ; La plupart des substances non métalliques ont un coefficient d'émissivité de 0,95. Celui de l'aluminium est de 0,3 alors que celui du béton ou du bois est de 0,95.

On va distinguer les thermomètres infrarouges à émissivité fixe ou réglable et ceux avec visée laser (circulaires ou ponctuels [1 ou 2 points]) ou non pour une meilleure localisation des points chauds.

Tableau 11.2 – Avantages de l'infrarouge par rapport aux autres technologies.

<table>
<tr><th>Principales causes d'erreur dans les mesures de température de surface des corps non transparents</th><th>Technologie infrarouge</th><th>Pyromètre optique conventionnel avec optique et laser</th><th>Capteur de surface thermocouples, Pt100</th></tr>
<tr><td>Erreur sur la connaissance du coefficient d'émissivité</td><td rowspan="8">Pas d'erreur car pas d'effet</td><td rowspan="5">Très sensible</td><td rowspan="5">Pas d'erreur car pas d'effet</td></tr>
<tr><td>Erreur de réglage du coefficient d'émissivité</td></tr>
<tr><td>Erreur due à la variation du coefficient d'émissivité (état de surface ΔT °C)</td></tr>
<tr><td>Erreur due aux réflexions parasites</td></tr>
<tr><td>Erreur due à la qualité de la surface</td></tr>
<tr><td>Erreur due à l'échauffement par friction (déplacement de la surface)</td><td rowspan="3">Pas d'erreur car pas d'effet</td><td rowspan="3">Très sensible</td></tr>
<tr><td>Erreur due aux transferts de chaleurs</td></tr>
<tr><td>Erreur due au temps de réponse (stabilisation)</td></tr>
</table>

Applications :

- Suivi de la chaîne du froid : constructeur de groupes frigorifiques : (contrôle de sortie, échangeurs, évaporateur, dépannage, mise au point…), constructeurs de chambres froides (contrôles des groupes, de la répartition du froid dans les chambres…), fabricant de surgelés, congelés, camions frigorifiques, rayon de distribution des grandes surfaces, magasins spécialisés.
- Agroalimentaire : constructeurs d'enceinte de transformation et de cuisson, constructeur de machine d'emballage thermoformage.
- Génie climatique : constructeurs de fours, de chaudières, de climatiseurs.
- Industrie en général : services après-vente (recherche de points chauds sur les machines tournantes, radiateurs de composants, photocopieurs, distribution électrique…).
- Plasturgie.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

11.3.2 Pourquoi la thermographie ?

La thermographie infrarouge (*figure 11.16*) trouve ses applications dans de très nombreux domaines, tels que :

- Contrôle, maintenance électrique et maintenance préventive[1] des installations électriques.
- Mécanique : contrôle et maintenance préventive des moteurs électriques, des pièces mécaniques en mouvement, des frottements…
- Bâtiment : contrôle des pertes thermiques, des fuites hydrauliques…
- Industrialisation/fabrication : produits manufacturés, contrôle de fin de chaîne…
- Laboratoire : R&D.
- Sécurité et retour sur investissement : encore faut-il que de tels vœux puissent être réalisables dans les limites des disponibilités financières des entreprises, la thermographie nécessitant un investissement de base non négligeable bien que des baisses de prix sensibles soient constatées au fil du temps.

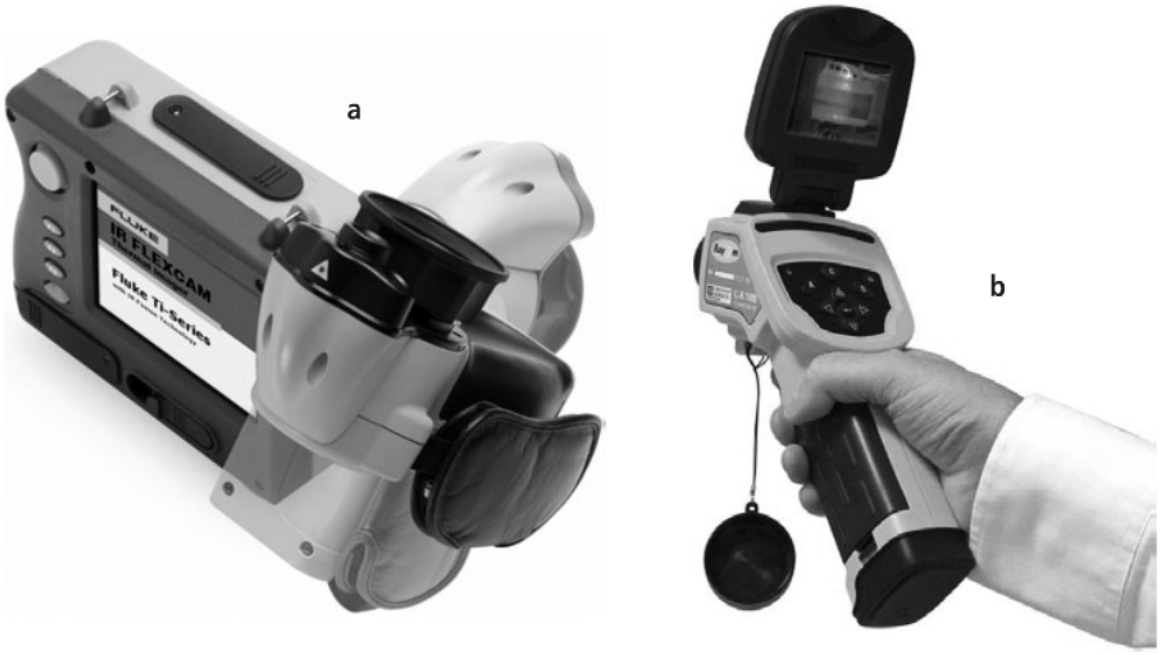


Figure 11.16 – Thermographes infrarouges (a) série Ti (Fluke) et (b) RayCam (Chauvin Arnoux).

Dans le domaine du contrôle, des sommes importantes sont déjà consacrées volontairement ou involontairement, au maintien en fonctionnement des installations et machines permettant la production.
Les arrêts intempestifs de production se traduisent par des pertes financières importantes, voire par la perte de clients pour livraisons tardives, d'autant plus que se généralisent de plus en plus « le juste à temps » et la gestion des stocks en « flux tendus ».

1. Maintenance préventive : Afnor X 60-010 « Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions ».

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

D'autre part, les accidents d'exploitation impliquent fréquemment des dommages corporels pour les personnels en place. Ce qui se traduit par l'augmentation des primes d'assurance dont les montants sont basés sur le taux d'accident de l'entreprise.

La thermographie permet (*figure 11.17*) :

– des gains importants sur les moyens humains nécessaires à la conduite des campagnes de contrôle et de maintenance ;
– une maintenance préventive rapide et précise des installations et des machines, évitant ainsi les interruptions intempestives de production et permettant par conséquent de réaliser de substantielles économies, d'améliorer la compétitivité des produits et la fidélisation des clients ;
– d'améliorer la sécurité des personnels, réduisant ainsi les coûts dus à l'absentéisme et permettant de baisser le taux de prélèvement des assurances.

C'est sur ces bases évidentes d'économies que doit être calculé le réel et rapide « retour d'investissement ». Celui-ci prend effet dès la mise en place de la thermographie en entreprise.

Figure 11.17 – Prises de vue d'images en thermographie.

Mécanique : contrôle et maintenance préventive des moteurs électriques, des pièces mécaniques en mouvement, des frottements : *figure 11.18*.

Bâtiment : contrôle des pertes thermiques, des chauffages par le sol, des fuites hydrauliques…

Industrialisation/fabrication :

– Test des appareils en fin de chaîne, contrôle général rapide, rejet des montages non conformes.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 11.18 – Exemple de contrôle dans le cadre de la maintenance préventive.

– Contrôles en endurance sur « table de chauffe », détection en dynamique et dans le temps de la bonne tenue des composants.
– Contrôles en endurance sur « table vibrante », détection des mauvais contacts ou des mauvaises soudures, etc.
– Contrôles de processus industriels.

R&D : test dynamique de circuits électroniques.

11.3.3 Aspects normatifs : norme NF A09-400

■ Quelques définitions

Thermographie infrarouge : vue permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge.

Appareillage de thermographie infrarouge : ensemble d'appareils permettant d'obtenir et de traiter une scène thermique. Ces appareils peuvent assurer en particulier l'analyse d'une scène thermique, le traitement des signaux correspondants, la manipulation des données ainsi obtenues, leur visualisation, leur enregistrement sur tout support. Suivant la configuration de l'appareillage et les fonctions disponibles sur les appareils utilisés, il peut être possible de procéder en outre, à partir de l'image thermique, à la mesure des luminances et/ou au calcul des températures.

Image thermique : répartition structurée des données représentatives du rayonnement infrarouge en provenance d'une scène thermique. Une image thermique

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

peut être obtenue à partir d'un balayage d'image en une ou plusieurs trames décalées spatialement.

Maintenance corrective (selon CEN 319-003) : « Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise… Elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données… Elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables. »

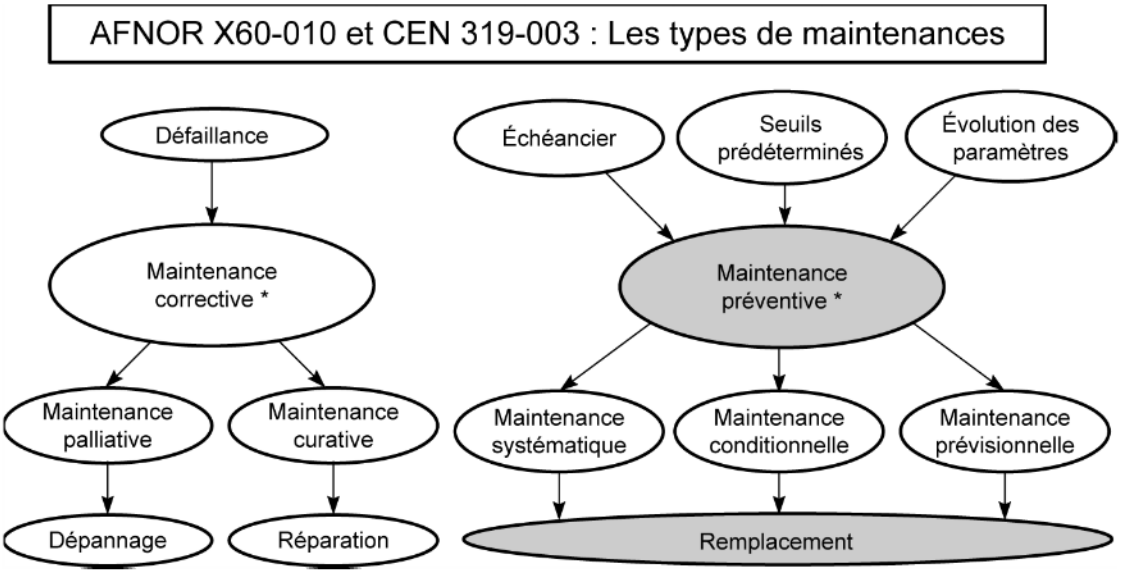


Figure 11.19 – Les types de maintenances selon les normes Afnor X 60-010 et CEN 319-003.

Maintenance préventive (selon la norme Afnor X 60-010) : « Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou des services (maintenance conditionnelle). L'objectif de la maintenance préventive demeure de réduire la probabilité de défaillance en tenant compte des ratios économiques. »

11.3.4 Rappel des fondamentaux

À quoi est sensible une caméra de thermographie infrarouge ?

À la **chaleur rayonnée**, pas à la température.

Quelle est la différence entre température et chaleur ?

La **température**, c'est ce qui représente l'état (ou *agitation*) thermique d'un matériau à un moment donné. On l'associe avec la vitesse aléatoire des molécules et atomes qui constituent la matière.

La température s'exprime légalement en **Kelvin** (K). Le degré Celsius (°C) et le degré Fahrenheit (°F) sont acceptés par usage (*figure 11.20*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

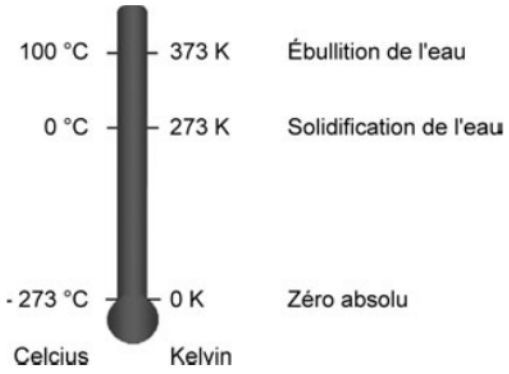


Figure 11.20 – Correspondance des températures en Kelvin et degrés.

La **chaleur** représente la quantité de molécules et d'atomes affectés d'une certaine température.
La chaleur est une énergie qui s'exprime légalement en **joules** (J). Les calories (1 cal = 4,184 J) et les watts.heure (Wh) sont acceptés par usage.
Il est primordial de bien faire la différence entre chaleur et température. **On peut additionner ou soustraire des Joules, mais on ne peut pas en faire de même avec des degrés**.
Exemple : si vous ajoutez dans un récipient, contenant de l'eau à 20 °C, la même quantité d'eau à 40 °C, vous n'obtiendrez jamais 60 °C.

■ Transferts thermiques

Il n'existe que trois modes de transfert de chaleur (*figure 11.21*) :

– la conduction ;
– la convection ;
– le rayonnement.

La **conduction** est le transfert de chaleur d'une molécule à l'autre suite à une collision *directe* entre celles-ci.

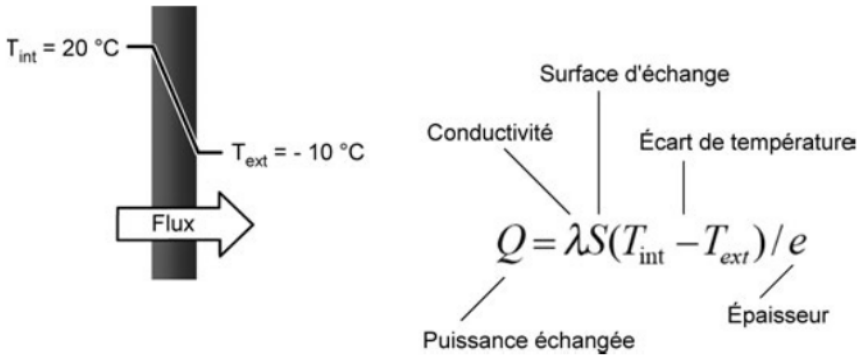


Figure 11.21 – Calcul du transfert de chaleur au travers d'une paroi ; application de la Loi de Fourier.

La **convection** est le transfert *indirect* de la chaleur d'une source aux molécules d'un récepteur.
La chaleur est transmise par collisions avec les molécules d'un milieu fluide intermédiaire.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Exemple : refroidissement par un milieu fluide naturel, le **vent** (*figure 11.22*).

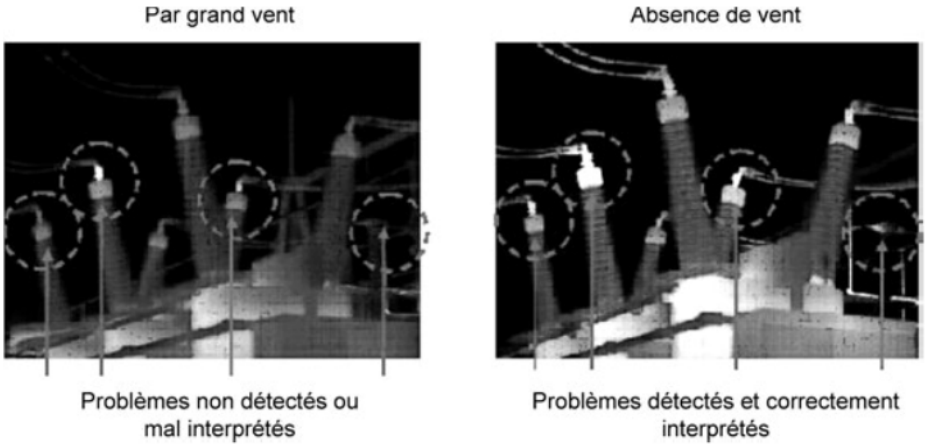


Figure 11.22 – Refroidissement par le vent.

Conclusion : pas de mesure par grand vent ! En effet :

- Il y a un risque de passer à côté d'un problème et/ou de mauvaise interprétation.
- Le ΔT diminue aussi avec le vent (par exemple refroidissement par infiltration d'air).
- Le bâtiment, chauffé, présente des fuites d'air.
- Une plus faible pression interne aspire l'air froid dans la pièce.
- Un flux d'air froid crée un motif sur les surfaces.

■ Spectre électromagnétique

Quelles sont les différentes utilisations des longueurs d'onde et où trouve-t-on le rayonnement infrarouge ?

□ Définition de l'onde

Une onde se propage comme une oscillation depuis l'endroit où le caillou est tombé dans l'eau.
Les ondes électromagnétiques sont caractérisées habituellement par leur longueur d'onde λ (*figure 11.23*). En infrarouge, l'unité est le micromètre (1 µm = 10^{-6} m = 1/1 000 mm).

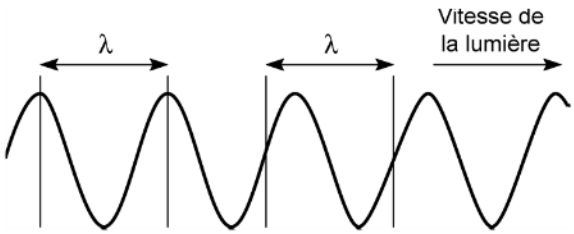


Figure 11.23 – Définition de l'onde.

□ Lumière visible

Spectre lumineux : la lumière blanche, telle que celle du soleil, est constituée du mélange de toutes les couleurs. Si cette lumière blanche traverse un prisme, il est possible de décomposer l'ensemble de ce spectre lumineux (*figure 11.24*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

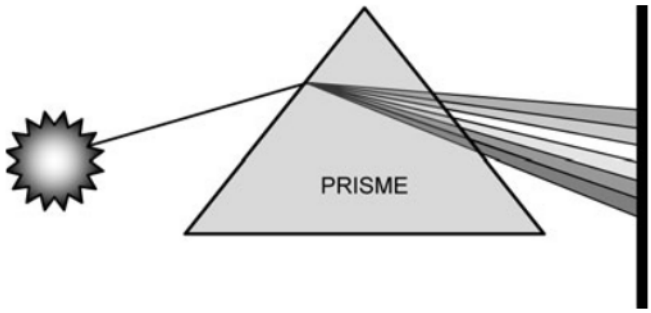


Figure 11.24 – Spectre lumineux.

Au début du XIXe siècle, **Herschel** découvre l'existence de rayonnements hors du spectre visible (*figure 11.25*).

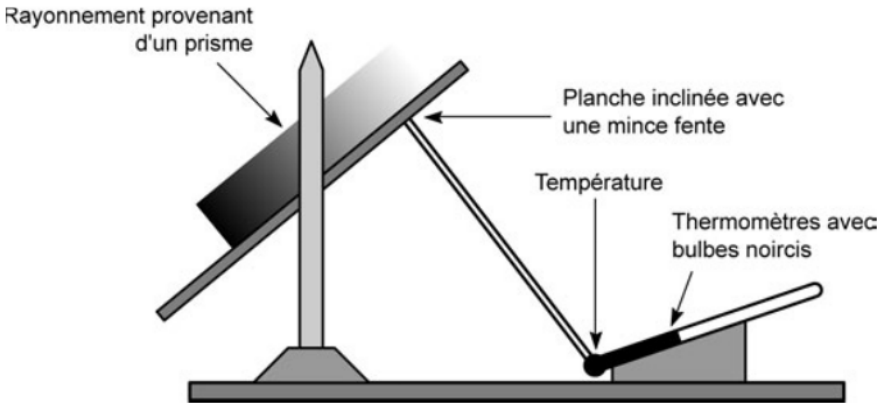


Figure 11.25 – Expérience d'Herschel.

Observations de Herschel : le bleu est plus froid, le rouge plus chaud. Au-delà du rouge, la température continue d'augmenter (*figure 11.26*) !

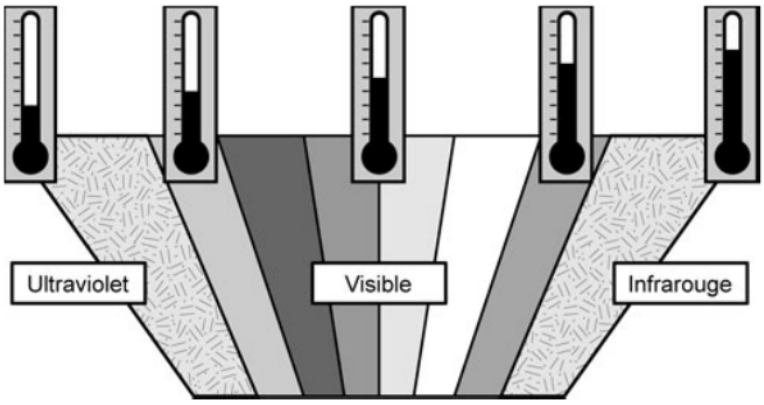


Figure 11.26 – Spectre lumineux et correspondance thermique.

☐ Rayonnement

Un matériau émet (naturellement ou non) des ondes électromagnétiques ; on dit qu'il *rayonne*. Les ondes se caractérisent par leur énergie et par leur longueur d'onde.

La chaleur est transférée par émission et absorption de rayonnement. Elle existe en partie dans l'ultraviolet, et surtout dans le visible et l'infrarouge.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière.

Le rayonnement ne nécessite pas de milieu matériel. Il existe dans le vide.

La théorie est connue, la résolution des problèmes est souvent très difficile, surtout dès qu'il est question d'interaction rayonnement/conduction.

Pour des niveaux de température courants sur Terre (de – 50 °C à 2 000 °C environ), les ondes émises naturellement par les matériaux le sont dans un domaine nommé l'**infrarouge thermique** (*figure 11.27*). Le spectre électromagnétique correspondant est présenté à la *figure 11.28*.

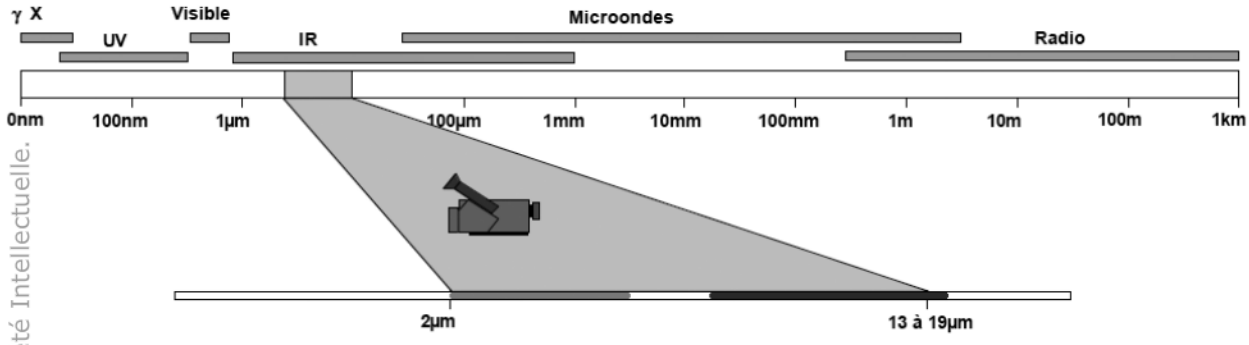


Figure 11.27 – Infrarouge thermique (de – 50 °C à 2 000 °C environ).

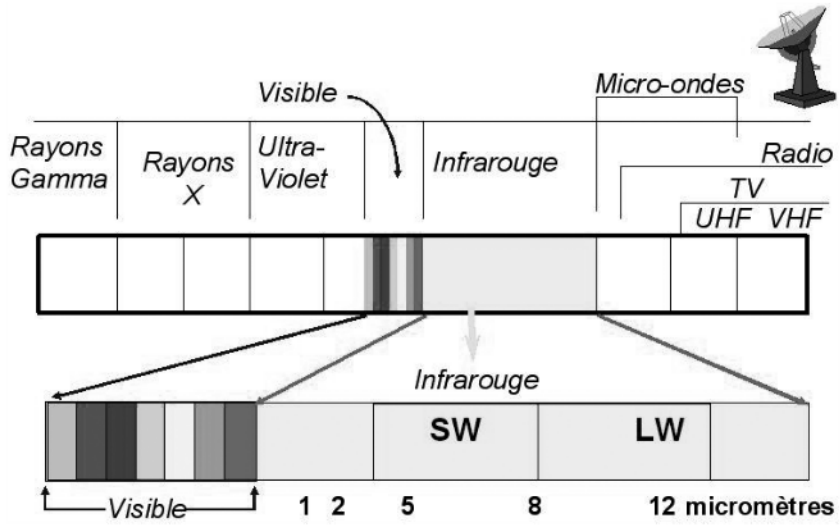


Figure 11.28 – Spectre électromagnétique.

Relation distance/résolution

Le capteur de la caméra est constitué d'un matriçage d'éléments sensibles, correspondants à autant de « mini-capteurs ». Ces mini-capteurs constituent les pixels de l'image thermographique.

Il est par conséquent impératif de bien cadrer l'image sur plusieurs d'entre eux pour effectuer une mesure valide. Le minimum est de 3 × 3 pixels. Ce cadrage est directement dépendant de l'angle de prise de vue de l'objectif et de la distance comprise entre la cible et la caméra (*tableau 11.3*).

Objectif : optique 18°

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Champ de vue : 18° × 13,5° Standard IFOV 1,9 mRad. Focalisation : manuelle.
Distance minimum de focalisation : 0,1 m.
Objectif : optique 38°
Champ de vue : 38° × 28,5° Standard IFOV 4,1 mRad.
Distance minimum de focalisation : 1 cm.

Tableau 11.3 – Distances de prise de vue en fonction des optiques.

Plus petit objet mesurable	Distance de travail
2×2 mm^2	0,5 m (minimum)
4×4 mm^2	1 m
8×8 mm^2	2 m
20×20 mm^2	5 m
$1{,}96 \times 1{,}96$ mm^2	1 m
$2{,}94 \times 2{,}94$ mm^2	1,5 m
$3{,}92 \times 3{,}92$ mm^2	2 m
$19{,}6 \times 19{,}6$ mm^2	10 m
$3{,}8 \times 3{,}8$ mm^2	0,5 m (minimum)
$7{,}6 \times 7{,}6$ mm^2	1 m
$11{,}5 \times 11{,}5$ mm^2	1,5 m
15×15 mm^2	2 m
38×38 mm^2	5 m

11.3.5 Mesures sur le terrain : comment utilise-t-on ce type d'appareil ?

Règle n° 1 : avant de réaliser une mesure, l'image doit être nette.
Règle n° 2 : composer votre image thermique :

– adapter la gamme température ;
– la couleur ;
– centrer le défaut, etc.

Règle n° 3 : l'objet doit avoir une émissivité suffisante pour pouvoir effectuer une mesure.
Règle n° 4 : l'objet visé doit être vu dans un angle d'incidence compris entre + 45° ou – 45° (*figure 11.29*).
Règle n° 5 : s'assurer que l'environnement ne vient pas perturber la mesure.
Règle n° 6 : s'assurer que la taille de l'objet visé est suffisante.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

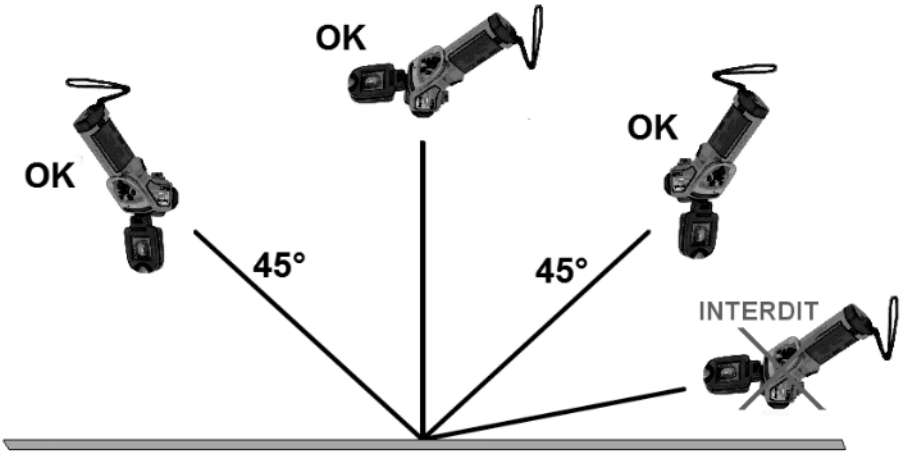


Figure 11.29 – Angle d'incidence compris entre + 45° ou – 45°.

11.3.6 Inspection électrique et mécanique standard

Suggestions minimales de classement des défauts :

■ **Conditions de température absolue**

Si le composant peut être touché par un opérateur habilité, sa température de surface ne doit pas dépasser :

– sans précaution, le seuil continu de douleur, soit environ 60 °C.
– avec précaution, le seuil limite fixé par le constructeur.

De façon générale, en électricité, la température d'un composant ne doit pas, normalement, excéder l'ambiance de + 40 °C (+ 70 °C pour les composants militaires).

■ **Conditions d'écart de température**

La température d'un composant supposé défectueux est comparée avec celle d'un composant sain identique travaillant dans des conditions similaires (*tableau 11.4*).

Tableau 11.4 – Type d'intervention en fonction de l'écart de température.

Écart ΔT	Sévérité
< 10 °C	Cela peut être un défaut. Dans l'incertitude, à surveiller
De 10 à 20 °C	Défaut 1 (avéré). Planifier une mesure corrective
De 20 à 40 °C	Défaut 2 (sérieux). Mesures correctives urgentes, dans la semaine généralement
> 40 °C	Défaut 3 (critique). Intervenir immédiatement

Si on admet que le défaut est de nature résistive, l'écart brut de température doit être compensé en fonction du carré de la charge :

$$\Delta T_{\text{effectif}} = \Delta T_{\text{brut}} \cdot (I_{\text{nominal}}/I_{\text{mesuré}})^2$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'**écart effectif** est à considérer pour la classification du défaut.
Exemple : on mesure un écart de 9 °C entre deux phases d'un disjoncteur de calibre 100 A, alors que le courant mesuré est de 30 A.
Considérant l'écart brut, il ne s'agit pas d'un défaut.
L'écart effectif compensé de la charge est de :

$$9 \times (100/30)^2 = 100\ °C$$

Le défaut passe alors en catégorie 3 (critique).

■ Conditions spéciales (inspection électrique des postes et lignes)

L'écart de température brut ΔT doit être corrigé des effets du vent et de l'intensité.

□ Correction des effets du vent

Le vent refroidit les défauts.
La correction dépend donc de la vitesse du vent (entre 1 et 8 m/s) :

$$\Delta T_{\text{corrigé du vent}} = \Delta T_{\text{brut}} . V0{,}45$$

□ Correction des effets de l'intensité

La charge est suffisante.
L'énergie est proportionnelle au carré de la charge.

$$\text{Charge } I_{\text{transit}}/I_{\text{MAP}} > 40\ \%$$

On utilise :

$$\Delta T_{\text{effectif}} = \Delta T_{\text{corrigé du vent}} . (I_{\text{MAP}}/I_{\text{transit}})^2$$

avec I_{MAP} l'intensité maximale admissible en permanence.

– Classe de sévérité 1 : $5\ °C < \Delta T_{\text{effectif}} < 50\ °C$
– Classe de sévérité 2 : $50\ °C < \Delta T_{\text{effectif}} < 100\ °C$
– Classe de sévérité 3 : $\Delta T_{\text{effectif}} > 100\ °C$

11.3.7 Quel matériel choisir ?

Détection rapide des problèmes. Détecte rapidement les anomalies de vos systèmes.
Un instrument « tout terrain » batterie et chargeur secteur incorporé.
Visualise, en temps réel, des images grâce à un détecteur matriciel microbolomètre non refroidi de dernière génération ne nécessitant pas de maintenance et une fréquence image de 50 Hz.
Mesures de températures précises, instantanées et sans contact. La caméra présentée à la *figure 11.30* vous permet de mesurer, sans contact et à distance, la température précise de toute surface, électrique ou mécanique, même en mouvement.
Pointeur laser, classe 2. Pour une mesure précise d'un point chaud.
Améliore la sécurité des usines et des opérateurs. La surchauffe du matériel est la principale cause des incendies. La caméra détecte les défauts avant qu'ils ne deviennent dangereux.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 11.30 – Caméra thermographe RayCam (Chauvin Arnoux).

■ Autres caractéristiques de matériels

□ Très grande sensibilité thermique

Fournit une image complète grâce à son microbolomètre UFPA.
Sa sensibilité thermique est de 0,1 à 0,12 °C (selon modèle).

□ Instrument « tout terrain »

Batterie Lithium et chargeur secteur. Autonomie : 2 heures (sur batterie).

□ Détection d'anomalies au bout des doigts

Grâce à l'accès direct intuitif, il suffit de viser et d'enregistrer.
La prise d'images et l'enregistrement se commandent par un simple bouton. Simple d'utilisation, l'interface utilisateur permet de gagner du temps dans les campagnes d'inspection et de réaliser ainsi un retour rapide sur investissement.

□ Connexion facile à un ordinateur (USB)

La caméra RayCam peut garder en mémoire 1 000 images radiométriques (thermogramme). De retour du terrain, ceci permet de les prévisualiser sous RayCam Report, de créer un rapport ou de les incorporer dans un rapport réalisé à partir de votre logiciel habituel, tel que Word par exemple.

□ Pointeur laser, classe 2

Pour une mesure précise du point chaud. Un curseur mobile permet de mesurer et d'analyser la température en un point.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Amélioration de la sécurité des usines

La caméra RayCam détecte les défauts avant qu'ils ne deviennent dangereux.
Elle permet d'éviter ou de réduire les arrêts intempestifs de production.
Elle améliore aussi grandement la sécurité des personnes.

■ Autres matériels optionnels

☐ Objectif

Champ de vue 6,4° et 38° (pour caméra 18°).

☐ Possibilité « haute température »

Jusqu'à 1 000 °C.

☐ Connexion facile à un ordinateur (USB)

La caméra RayCam peut garder en mémoire 1000 images en « jpeg radiométrique » : tous les paramètres de mesure peuvent être modifiés lors de l'analyse par le logiciel RayCam Report.
Toutes ces images, facilement transférées dans le logiciel, permettent une analyse ultérieure détaillée et l'émission d'un rapport.

☐ Retour sur investissement

Les caméras infrarouges ont prouvé qu'elles sont des outils inestimables pour la maintenance préventive.
Elles peuvent localiser les problèmes bien avant la défaillance, ce qui se traduit par un retour sur investissement rapide en évitant de coûteux arrêts de production, des campagnes de contrôles plus rapides et d'éviter d'éventuels accidents du travail.
La sonde infrarouge C.A 874 s'adapte sur tous les multimètres ayant une impédance d'entrée de 10 MΩ. Elle délivre 10 mV/°C, sortie sur fiches bananes standard via son cordon extensible.
Sa gamme de mesure – 20 à + 260 °C et ses caractéristiques techniques sont identiques au thermomètre C.A 870.
C.A Infratherm : la particularité de ce thermomètre infrarouge sans visée laser est de mesurer la température en surface et de l'afficher numériquement sans se préoccuper du coefficient d'émissivité. deux gammes cinq modèles en capteur intégré ou déporté de – 45 °C à + 540 °C.
C.A Scrutherm : mesure les écarts de température compris entre 1/10 de °C et 100 °C. Affichage par rampe à diodes. Le modèle AAM 1001 est destiné au montage à demeure sur un process et est pourvu d'une sortie analogique 10 mV par °C.
80T-IR de Fluke : permet de convertir tout multimètre possédant une entrée mV DC avec une impédance > 10 MΩ en thermomètre infrarouge. Émissivité fixe, précision de ± 3 °C, étendue de mesure – 18 °C à + 260 °C, rapport distance objet/diamètre de la cible 4/1.
Des caméras thermiques à infrarouge sont employées dans l'industrie ou les laboratoires de recherche en maintenance préventive pour la détection de défaut, sur

des circuits électriques, la mauvaise isolation thermique des panneaux réfractaires de four, des points sur des circuits électroniques ou des paliers de moteurs…

Elles ont la particularité, d'avoir un champ de vison plus important (grand angle), de posséder la fonction zoom, une mise au point automatique ou manuelle, de visionner en temps réel sur un écran LCD 5 pouces, de mémoriser des valeurs sur carte PCMCIA (80 Mo). Les autres caractéristiques sont communes à tous les matériels présentés.

■ Caméras infrarouges des séries Ti et IR FlexCam (Fluke)

Les caméras infrarouges de la gamme Ti de Fluke (Ti 20 à IR FlexCam) sont particulièrement adaptées aux techniciens pour l'inspection et la maintenance des installations électriques. La série IR FlexCam est, elle, destinée aux spécialistes de la maintenance prédictive.

En combinant les images visibles et infrarouges, à partir de la technologie IR Fusion de Fluke, la caméra IR FlexCam offre à l'utilisateur une image unique proche de la vision réelle de l'installation. Cette fonctionnalité accentue les détails susceptibles d'aider à localiser plus précisément les anomalies et échauffements sur site.

La gamme de caméras de Fluke est disponible en différentes tailles de détecteurs, plages de température et sensibilités thermiques en fonction de la qualité d'image souhaitée par l'utilisateur (Ti 20, 30, 40, 45 et IR FlexCam Ti 50 et 55) et en fonction des attentes de l'utilisateur.

Les caméras infrarouges sont totalement radiométriques. Les données de mesure de chacun des milliers de points du capteur sont enregistrées. Tous ces points de données sont utilisables pour les analyses et les rapports sur la caméra. Ils sont aussi exploitables pour une analyse ultérieure dans le logiciel fourni avec chaque appareil.

□ Caméras destinées à la maintenance et à l'inspection des installations électriques

Les caméras de type Ti 20 ou Ti 30 (produits d'entrée de gamme de Fluke) sont adaptées pour la maintenance sur site des installations. Elles offrent la possibilité d'effectuer des diagnostics sur un champ d'applications propres au domaine industriel. Leur simplicité d'emploi autorise l'exploitation de celles-ci par un personnel de maintenance.

Chaque caméra infrarouge de type Ti 20 et Ti 30 est livrée avec le logiciel InsideIR qui permet de stocker et d'analyser des thermogrammes et leurs données. Il permet aussi de produire des rapports de thermographie professionnels. L'utilisateur peut insérer dans son rapport des préconisations relatives aux problèmes constatés sur l'installation électrique.

□ Caméras adaptées pour les professionnels et les concepteurs d'installations électriques

La technologie IR Fusion place le thermogramme mesuré en relation avec une vraie photo. En combinant les deux images en une seule, elle assure ainsi une meilleure visibilité et révèle ainsi les éléments dont la température est hors tolérances (*figure 11.31*).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Un logiciel SmartView fourni avec l'appareil réalise la production de rapports comportant des historiques ou des comparatifs établis à partir de mesures précédentes.

Figure 11.31 – Caméra infrarouge de haute technicité (IR FlexCam).

11.4 Data logger

Dans un chapitre précédent, nous avons vu les data logger ou simple logger (à grandeur physique unique).
Les data logger en température sont très utilisés et sont particulièrement développés en agroalimentaire de façon à placer un simple logger à l'intérieur d'un contenant de suivi de tout le process de fabrication – stérilisation, pasteurisation, vinification, désinfection des instruments en milieu hospitalier (autoclave).

11.5 Choix d'un thermomètre (capteur de température et appareil de mesure)

En règle générale, pour un même degré de protection vis-à-vis de l'environnement, le choix entre un capteur à couple thermoélectrique et un capteur à résistance thermométrique, dépend :

– de la zone d'utilisation en température : les capteurs à résistance thermométrique sont généralement utilisés pour les mesures de température inférieures à + 200 °C. Les capteurs à couple sont généralement utilisés pour les mesures de température supérieures à + 300 °C. Entre + 200 °C et + 300 °C, on utilise indifféremment les capteurs à résistance thermométrique ou les capteurs à couple thermoélectrique ;
– des conditions d'exploitation : souvent interviennent, la configuration de l'installation (distance et nature du matériel relié aux capteurs) et le coût de l'installation (liaison en câble cuivre 3 ou 4 conducteurs, câble de compensation ou convertisseur plus câble) ;
– de la précision souhaitée ;
– du temps de réponse.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

En régime dynamique et tout autre facteur identique (égalité de diamètre extérieur et de matériau de protection), un couple thermoélectrique dont la jonction de mesure est à la masse aura une inertie plus faible qu'une jonction isolée.
D'autres critères peuvent également intervenir en faveur de l'infrarouge :

– chocs mécaniques, vibrations ;
– localisation précise du point de mesure par rapport à la source de chaleur ;
– accès limité pour l'insertion d'un thermomètre.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

12 • MESURE DE LA VITESSE

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

12.1 Quelques rappels

12.1.1 De quelle vitesse parle-t-on ?

Il faut différencier la vitesse mécanique (tachymètre sur un moteur, un broyeur, un concasseur, un mélangeur…) du vent (anémomètre : applications météo, agriculture, génie civil, chimie, grues, portiques) et des phénomènes électriques (mesure du temps : temps de montée, de transfert, de réaction d'un asservissement, de décharge d'un circuit RC…).

12.1.2 Quelle est l'unité de la mesure de vitesse ?

L'unité de base de la vitesse est le mètre par seconde (m/s).
Deux unités à prendre en compte. Comme chacun le sait, la vitesse est fonction du rapport de la distance parcourue sur le temps.

■ Unité de distance : le mètre

Le mètre (m) est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde.
Quelques longueurs remarquables :
1 angström (Å) = 10^{-10} m
1 pouce = 1 Inch (in) = 2,54 cm
1 pied = 1 foot (ft) = 30,48 cm
1 yard (yd) = 0,9144 m
1 mile (mi) = 1,609 km
1 mille nautique = 1,852 km

■ Unité de temps : la seconde

La seconde (s) est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

■ Autres unités couramment rencontrées

Le kilomètre par heure (km/h).
Le mile per hour (mph).

Le feet per minute (ft/min).
Le nœud (knot en anglais) équivaut à 1 mille nautique par heure.

■ **Quelques vitesses remarquables**

La vitesse de la lumière (symbole « c ») dans le vide : 299 792 458 m/s.
Le son dans l'air : environ 340 m/s.
Le nœud : 0,5144 m/s.
Les ultrasons dans l'acier : environ 5 900 m/s.
Un courant électrique dans le cuivre : 1 000 km/s.
La Terre sur son orbite : 30 km/s.

12.1.3 Quelques définitions

La *précision* ou *exactitude* : étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et la valeur conditionnellement vraie de la grandeur mesurée.
La *résolution* : la plus petite différence de la valeur qu'un appareil peut distinguer.
La *classe de précision* : rapport entre l'erreur commise à l'étalonnage et l'étendue de mesure. Un appareil est de classe *n* si l'erreur est ± *n* % de l'étendue de mesure.
L'*erreur absolue* : écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie.
L'*erreur relative* : rapport de l'erreur absolu sur la valeur vraie.
L'*erreur de linéarité* : écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie située sur la droite théorique, passant par l'origine, représentant la réponse idéale d'un instrument de mesure.
La *sensibilité* : rapport entre l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure et de l'accroissement correspondant au signal d'entrée.
La *fidélité* : qualité d'un instrument de mesure à délivrer, dans des conditions d'utilisations définies, des réponses très voisines lors de l'application répétée d'un signal d'entrée.
La *répétabilité* : qualité des mesurages représentant l'étroitesse de l'accord entre le résultat des « mesurages » successifs du même mesurande, effectués strictement dans les mêmes conditions.
La *reproductibilité* : qualité des mesurages représentant l'étroitesse de l'accord entre les résultats des « mesurages » du même mesurande, effectués dans des conditions différentes, qu'il faut alors spécifier.

12.2 Vitesse de rotation

Tachymètre électromagnétique : entraîné mécaniquement, c'est une génératrice qui délivre une tension continue dont l'amplitude est proportionnelle à la vitesse de rotation. Un simple voltmètre suffit alors à connaître cette vitesse. Par contre, elle nécessite balais et collecteur source de parasites de commutation et d'une durée de vie limitée.
Génératrice à courant alternatif : entraînée mécaniquement, c'est à la fois la fréquence et l'amplitude du signal qui sont proportionnelles à la vitesse de rotation. Dans

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

le premier cas, une conversion fréquence/tension est nécessaire dans le second, un redressement et filtrage seront indispensables.
On distingue deux types de tachymètre à impulsions :

– mode fréquencemètre : on compte le nombre d'impulsions pendant un temps donné. Bien adapté aux fréquences moyennes à élevées ;
– mode périodemètre ou fréquencemètre réciproque : on compte le temps écoulé entre deux impulsions. Bien adapté aux fréquences faibles (*figure 12.1*).

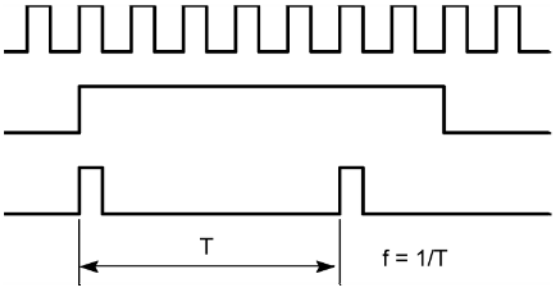


Figure 12.1 – Principe du fréquencemètre réciproque.

12.2.1 Tachymètres à impulsions optiques

Barrière optique : un faisceau lumineux partant d'un point A est émis vers une cellule photoélectrique réceptrice située en un point B. L'interruption de ce faisceau génère une impulsion.
Système Reflex : cette barrière a la même fonction que la précédente, mais, dans ce cas, la cellule photoélectrique réceptrice est placée au même endroit que la source lumineuse soit au point A. Le faisceau parvient à la cellule réceptrice par un réflecteur situé au point B.
Système à codeur optique : c'est un système plus complet qui délivre un grand nombre d'impulsions par tour (100, 500, 1000…) déterminant la résolution. Un disque présentant une alternance de parties opaques et transparentes coupe un faisceau optique (*figure 12.2*).

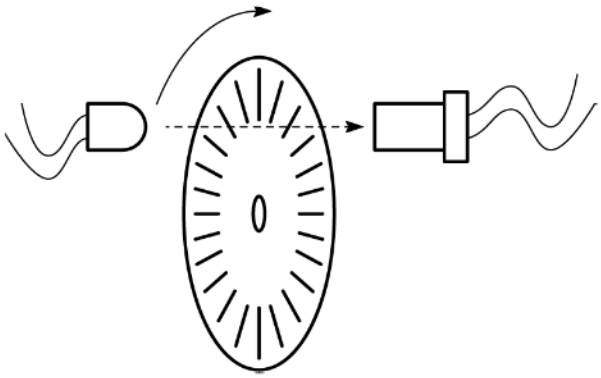


Figure 12.2 – Principe du codeur optique.

On en distingue deux types : les codeurs incrémentaux et absolus.

12.2.2 Principe du codeur rotatif optoélectronique

Le codeur rotatif optoélectronique est un capteur de position angulaire. Il est fixé sur l'axe de la machine qui l'entraîne.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

À l'intérieur se trouve un disque qui comporte une succession de zones opaques et transparentes.

La lumière émise par des diodes électroluminescentes arrive sur des photodiodes chaque fois qu'elle traverse les zones transparentes du disque.

Ce signal issu des photodiodes est amplifié et converti en un signal carré avant d'être envoyé à un variateur de vitesse électronique ou une unité de traitement.

La sortie électrique du codeur représente numériquement la position angulaire de l'axe de la machine.

12.2.3 Types de codeurs rotatifs optoélectroniques

– Codeurs incrémentaux (*figure 12.3*), applications : comptage, positionnement par comptage (*figure 12.4*).
– Codeurs absolus monotours et multitours, applications : positionnement absolu par mot gray ou binaire (*figure 12.5*).
– Tachymètres-codeurs et tachymètres, applications : contrôle de vitesse par lecture de la fréquence des impulsions.

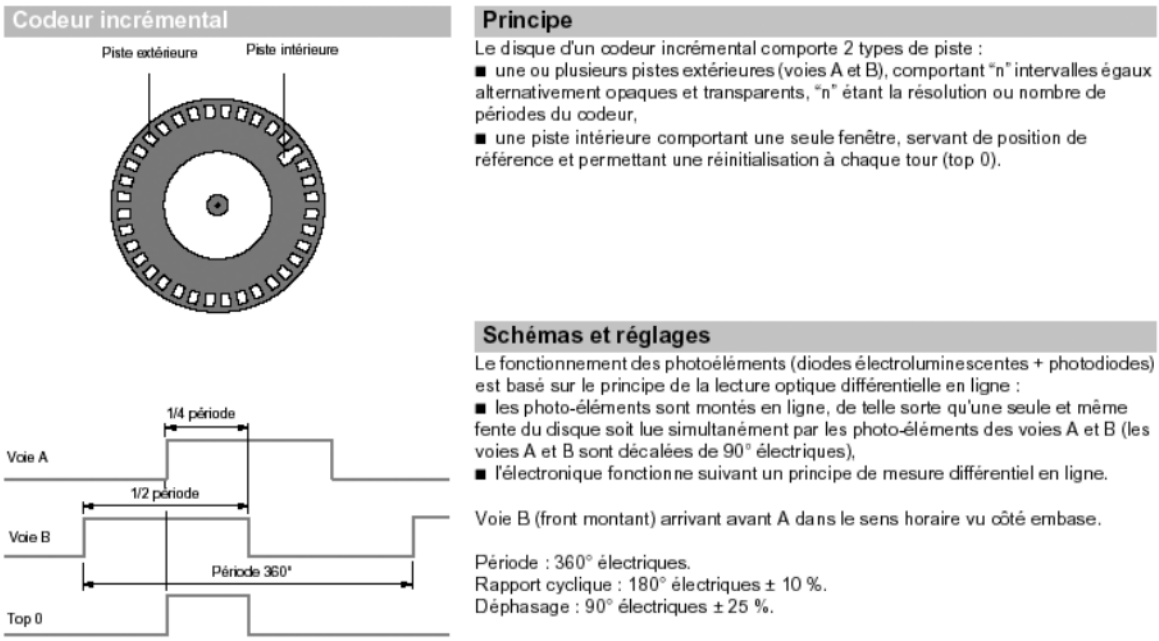
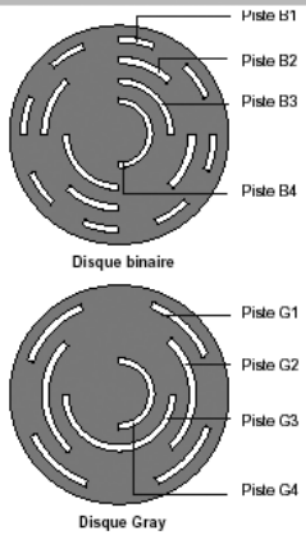


Figure 12.3 – Principe du codeur incrémental (Schneider Electric).

Figure 12.4 – Codeur incrémental XCC1 (Schneider Electric).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Codeur absolu



Principe

Le disque d'un codeur absolu comporte "n" pistes concentriques divisées en segments égaux alternativement opaques et transparents. A chaque piste est associé un couple émetteur/récepteur.

La piste intérieure est composée d'une moitié opaque et d'une moitié transparente. La lecture de cette piste, bit de poids le plus fort (MSB : Most Significant Bit), permet de déterminer dans quel demi-tour on se situe.

La piste suivante est divisée en 4 quarts alternativement opaques et transparents. La lecture de cette piste combinée avec celle de la piste précédente permet de déterminer dans quel quart de tour on se situe.

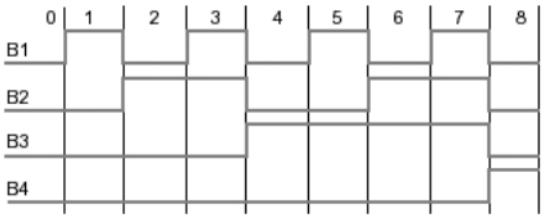
Les pistes suivantes permettent de déterminer dans quel huitième de tour, seizième de tour, etc. on se situe.

La piste extérieure correspondant au bit de poids le plus faible (LSB : Least Significant Bit) donne la précision finale. Elle comporte 2^n points correspondant à la résolution du codeur. Ainsi pour chaque position angulaire de l'axe, le disque fournit un code, qui peut être soit un code binaire, soit un code Gray.

Au bout d'un tour d'axe complet du codeur, les mêmes valeurs codées se répètent. Le codeur absolu multitours, outre la position numérique dans le tour, délivre en plus le nombre de tours d'arbre effectués.

Codage binaire

Le code binaire est directement exploitable par les systèmes de traitement (automates programmables par exemple) pour effectuer des calculs ou des comparaisons mais il présente l'inconvénient d'avoir plusieurs bits qui changent d'état entre 2 positions.



Codage Gray

Le code Gray présente l'avantage de ne changer qu'un seul bit entre 2 nombres consécutifs.

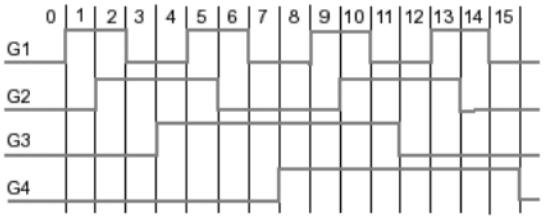


Figure 12.5 – Principe du codeur absolu (Schneider Electric).

12.2.4 Avantage de la lecture différentielle en ligne

La lecture des photos-éléments montés en ligne permet de remédier au jeu de l'axe du codeur > 30 % à celui d'un codeur à lecture optique classique et aux dépassements des limites en terme de déphasage entre les voies A et B.

L'émission par une source lumineuse triple permet de conserver le rapport cyclique même en cas de panne de l'un des trois composants d'émission, en cas de baisse du rendement (30 %) ou dépôts de poussières réduisant l'amplitude des signaux issus de ceux-ci.

Un codeur absolu est un disque comportant *n* pistes concentriques divisées en segments égaux alternativement opaques et transparents. À chaque piste correspond un couple émetteur-récepteur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

La piste inférieure est composée d'une moitié opaque et d'une moitié transparente. La lecture de cette piste de bit de poids le plus fort (MSB, *Most Signifiant Bit*) permet de déterminer dans quel demi-tour on se situe.
La piste suivante est divisée en 4 quarts alternativement opaques et transparents. La lecture de cette piste est combinée avec celle de la piste précédente et permet de déterminer dans quel quart de tour on se situe.
Les pistes suivantes permettent de déterminer dans quel huitième de tour, seizième de tour, etc., on se situe.
La piste extérieure correspond au bit de poids le plus faible (LSB) et donne la précision finale. Elle comporte 2^n points correspondants à la résolution du codeur. Ainsi pour chaque position angulaire de l'axe se disque fournit un code qui peut être soit un code binaire soit un code gray ou binaire réfléchi.
Au bout d'un tour complet, les mêmes valeurs codées se répètent.
Le codeur absolu multitour, outre la position numérique dans le tour, délivre en plus le nombre de tours d'arbre effectués.

12.2.5 Codeur absolu

Un codeur absolu délivre en permanence un code image de la position réelle du mobile à contrôler et n'est pas soumis comme le codeur incrémental (qui donne un nombre d'impulsions à partir d'une origine) à la perte d'information de position lors de la coupure de l'alimentation.
Le codeur absolu, dès la remise sous tension, délivrera l'information de position exploitable par le système de traitement (*figure 12.6*).

Figure 12.6 – Codeurs absolus multitours XCC3 (Schneider Electric).

Principe : le tachymètre-codeur utilise le principe de la lecture optoélectronique du codeur incrémental. La sortie analogique est obtenue par transformation de la fréquence de lecture des impulsions fournies en courant ou tension proportionnels.
Les sorties tension assurent la liaison vers les systèmes de traitement. Les sorties courant permettent un fonctionnement par boucle de courant dans toutes les applications à fortes perturbations.
L'isolement galvanique des deux fonctions incrémentale et analogique permet d'utiliser les informations du codeur pour l'asservissement de position par calculateur et les informations analogiques pour l'asservissement de vitesse.
Le tachymètre ne dispose pas d'étage de sortie comptage.
Détaillons la mise en œuvre et les précautions à prendre.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 12.1 – Caractéristiques de différents codeurs à choisir selon l'application (Schneider Electric).

7 caractéristiques sont à définir

1 - Fonction	Codeur incrémental	Donne une indication de comptage.
	Codeur absolu monotour	Donne une position absolue dans chaque tour.
	Codeur absolu multitour	Donne une position absolue dans chaque tour et indique le nombre de tours.
	Tachymètre-codeur	Donne une indication de comptage et un signal analogique proportionnel à la vitesse de rotation.
	Tachymètre	Donne un signal analogique proportionnel à la vitesse de rotation.
2 - Diamètre du boîtier	Codeurs incrémentaux	Ø 40, 58 et 90 mm
	Codeurs absolus monotours et multitours	Ø 58 et 90 mm
	Tachymètres-codeurs et tachymètres	Ø 90 mm
3 - Diamètre d'axe	Ø 6 mm à 30 mm selon les modèles.	
4 - Type d'axe	**Axe plein** : l'axe du codeur est relié à l'arbre d'entraînement au moyen d'un accouplement flexible. Ce dernier permet d'absorber des défauts d'alignement.	
	Axe creux : le codeur se monte directement en bout de l'arbre d'entraînement. Un joint homocinétique assure l'immobilisation en rotation et permet d'absorber des défauts d'alignement.	
	Axe traversant : le codeur se monte directement sur l'arbre d'entraînement. Il est maintenu sur l'arbre soit par des vis de serrage, soit par un collier de serrage concentrique. Le codeur peut être immobilisé en rotation soit par une pige (fixation rigide), soit par une fixation souple anti-rotation.	
5 - Type de raccordement	• Par câble blindé (longueur = 2 m) ou par connecteur. • Emplacement du raccordement axial ou radial suivant les modèles.	
6 - Résolution	• Nombre de points par tour. • Nombre de tours (pour les codeurs absolus multitours).	
7 - Type de sortie	Codeurs incrémentaux	• Sortie driver 5 V, RS 422, 4,5…5,5 V. • Sortie driver push-pull 11…30 V.
	Codeurs absolus monotours (selon modèles)	• Sortie PNP collecteur ouvert avec protection CTP, 11…30 V, code binaire. • Sortie NPN collecteur ouvert, avec protection CTP, 11…30 V, code binaire. • Sortie driver push-pull, 11…30 V, code binaire ou code gray. • Sortie SSI sans parité, horloge 25 bits, 11…30 V, code binaire ou code gray.
	Codeurs absolus multitours (selon modèles)	• Sortie PNP collecteur ouvert avec protection CTP, 11…30 V, code binaire ou code gray. • Sortie NPN collecteur ouvert avec protection CTP, 11…30 V, code binaire ou code gray. • Sortie NPN collecteur ouvert sans protection, 11…30 V, code gray ou code gray onde inverse. • Sortie SSI sans parité, horloge 25 bits, 11…30 V, code binaire ou code gray.
	Tachymètres-codeurs et tachymètres	**Sortie incrémentale** (pour tachymètres-codeurs uniquement) • Sortie driver 5 V, RS 422, 4,5…5,5 V. • Sortie driver push-pull 11…30 V. **Sortie analogique** • 0…10 V. • 0…± 10 V. • 0…20 mA ou 4…20 mA. • 0…± 20 mA.

■ Types de câbles

Employer des câbles blindés pour les liaisons de codeurs incrémentaux de plus de 50 m, utiliser des câbles à plusieurs paires torsadées, renforcées par un blindage extérieur.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Utiliser des conducteurs de sections de 0,14 mm^2 au minimum.
Codeurs alimentés en 5 V : en raison des chutes de tension en ligne, il est recommandé d'utiliser pour les fils d'alimentation 0 V et + 5 V des sections de conducteurs minimales de :
– 0,14 mm^2 si distance source/codeur < 30 m ;
– 0,22 mm^2 si distance source/codeur > 30 m.

Raccordement

Éloigner au maximum les câbles de raccordement des codeurs des câbles de puissance et éviter les cheminements parallèles. Maintenir un écartement de 20 cm au moins et veiller à réaliser les croisements à angle droit.
Regrouper les signaux de nature par paire :
– Paire 1 : alimentation 0 V et + 5 V.
– Paire 2 : A et A/.
– Paire 3 : B et B/.
– Paire 4 : 0 et 0/.

Tous les conducteurs non utilisés devront être reliés aux deux extrémités à un même potentiel.
Dans les ambiances perturbées, il est conseillé de relier l'embase du codeur à la terre, à l'aide d'une des vis de fixation.
Relier les entrées de contrôle à un potentiel.
Distribuer et raccorder le 0 V suivant la technique en « étoile ».
Mettre à la terre les blindages par une reprise de tresse à 360°. La mise à la masse des blindages est à effectuer aux deux extrémités de chaque câble. Pour mettre les blindages à la terre, utiliser un câble de section minimum.
Relier le 0 V de l'alimentation des codeurs à la masse côté alimentation.

Alimentation

Il est impératif d'employer des alimentations stabilisées dédiées au codeur. Pour des codeurs 11… 30 V, la réalisation de l'alimentation au moyen de transformateurs délivrant à leur secondaire du 24 Veff suivis d'un redresseur et de condensateurs de filtrage est prohibée car la tension continue est supérieure à la valeur limite haute de l'alimentation souhaitée des codeurs.
Lors d'une première mise sous tension, avant le raccordement de l'alimentation d'un codeur, vérifier, le codeur déconnecté, que la tension délivrée corresponde bien à la tension assignée d'alimentation du codeur.

Connexion et mise sous tension

La connexion ou la déconnexion du connecteur de raccordement d'un codeur n'est réalisée qu'après la coupure préalable de l'alimentation :
– Codeur alimenté par l'unité centrale : couper l'unité centrale, procéder à la connexion ou à la déconnexion, remettre l'unité centrale sous tension.
– Codeur alimenté par une source extérieure à l'unité centrale : couper l'alimentation de l'unité centrale puis ensuite celle du codeur, procéder à la connexion ou

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

à la déconnexion, remettre l'alimentation du codeur sous tension puis ensuite l'unité centrale de traitement.

Pour des raisons de synchronisme, les mises sous tension et mises hors tension du codeur doivent être simultanément opérées avec celles de l'électronique qui lui est associée.

12.2.6 Tachymètres à impulsions inductives (*figure 12.7*)

Capteur à oscillateur bloqué ou à courant de Foucault : un oscillateur électronique oscille librement en l'absence de cible métallique et absorbe un courant d'alimentation faible (1 mA environ). Dès qu'une cible est présente dans son champ de détection, l'oscillateur se bloque et consomme un courant plus élevé (3 mA). Ces impulsions en courant sont transformées en tension par une simple résistance. Ce capteur peut fonctionner en statique et travaille correctement jusqu'à des fréquences de quelques kilohertz.

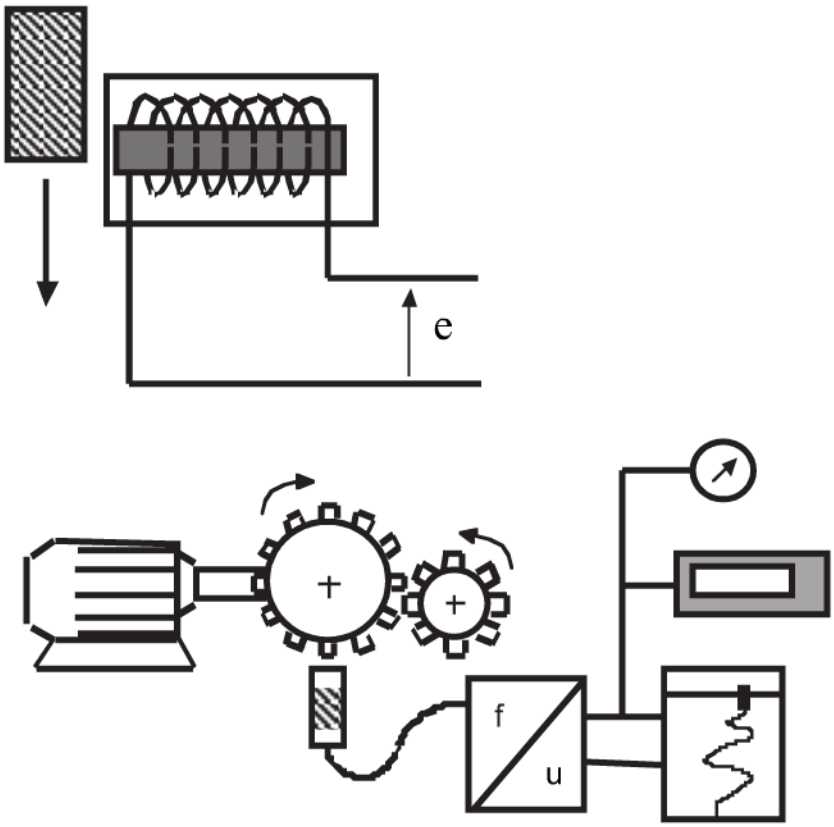


Figure 12.7 – Tachymètre à impulsions inductives (principes et modélisation).

Capteur à réluctance variable (*figure 12.8*) : il est constitué d'un barreau aimanté et d'un bobinage à grand nombre de spires. Le déplacement d'une cible ferromagnétique dans le champ de détection provoque l'apparition d'une force électromotrice aux bornes du bobinage (loi de Lenz). Ce type de capteur ne fonctionne correctement qu'à haute fréquence car l'amplitude de la tension induite dépend de la vitesse de déplacement de la cible. Cette amplitude doit être suffisante pour être détectée par un dispositif électronique (comparateur).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 12.8 – Capteur à réluctance variable type PF (Chauvin Arnoux).

Citons quelques cas spéciaux.
Il est toujours possible de dériver (avec un circuit dérivateur) le signal issu d'un capteur de position afin d'obtenir une information de vitesse. Cependant, ce procédé a des limites (bruit, parasites…) inversement, il est possible d'intégrer (avec un circuit électronique intégrateur) le signal issu d'un capteur d'accélération. Cette méthode est relativement complexe à mettre en œuvre. Tout signal mesurable et proportionnel à une vitesse peut servir (couple de rotation d'un gyroscope, signal acoustique, battement de fréquence…).

12.2.7 Tachymètres à contact mécanique

L'information délivrée par un contact actionné périodiquement (relais, came…) peut être exploitée en mesure de faible vitesse (quelques dizaines de hertz maximum).

12.2.8 Capteur à effet stroboscopique

Principe : la persistance rétinienne (effet mémoire de la rétine de l'œil) est utilisée pour synchroniser une fréquence variable avec la fréquence de la cible dont on veut connaître la vitesse de rotation. Quand les fréquences sont identiques, la cible paraît immobile (*figure 12.9*). Comme on connaît la fréquence variable, on en déduit la vitesse de la cible.

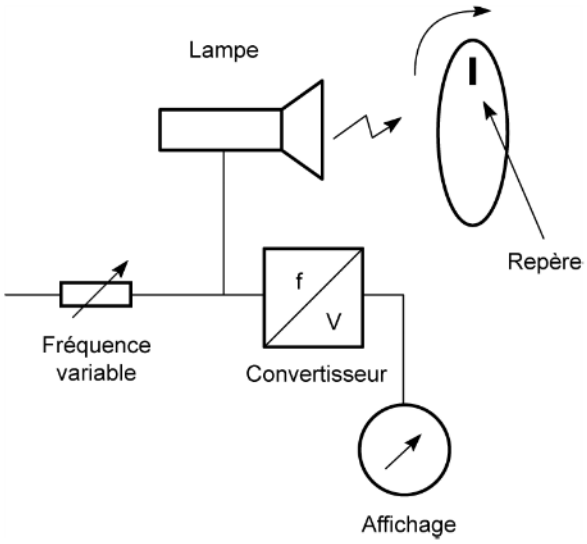


Figure 12.9 – Tachymètre stroboscopique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

12.2.9 Stroboscope numérique (*figure 12.10*)

Affichage fréquence 10 000 points.
Base de temps à quartz.
Deux gammes de mesure :

– 100 à 1 000 éclairs/min ;
– 1 000 à 10 000 éclairs/min.

Résolution : 1 éclair/min.
Précision : 0,05 %.
Alimentation : secteur 230 V – 50 Hz.

Figure 12.10 – Stroboscope numérique CDA 9452 (Chauvin Arnoux).

12.2.10 Gyromètres

Gyromètre mécanique : mesure une vitesse angulaire et est basé sur les propriétés du gyroscope (naissance d'un couple de rotation proportionnel à la vitesse angulaire).
Gyromètre optique à laser et fibre optique : les distances parcourues par les ondes dans un milieu en mouvement sont différentes selon que l'onde se propage dans le sens du mouvement ou dans le sens contraire. À l'aide d'un interféromètre, on met en évidence cette différence, proportionnelle à la vitesse du mouvement.

12.3 Vitesse de défilement

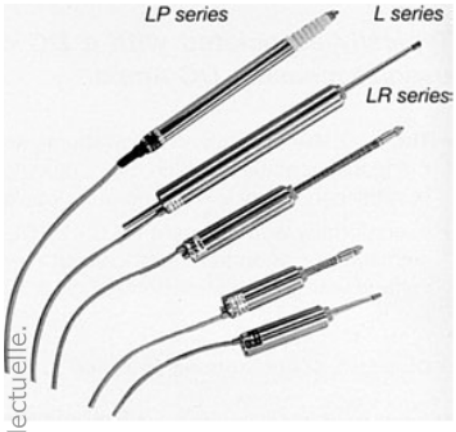
12.3.1 Tachymètre électromagnétique de vitesse linéaire

Fortes amplitudes (< 1 m) : la mesure est ramenée à une vitesse angulaire, par exemple au moyen d'une roulette ou encore sur l'une des pièces tournantes solidaires de l'entraînement linéaire.
Faibles amplitudes : il est possible de mesurer une vitesse linéaire à l'aide d'une bobine à l'intérieur de laquelle se déplace un aimant, rendu solidaire du déplacement. On récupère ainsi aux bornes de la bobine, une f.e.m. proportionnelle à la vitesse de déplacement de l'aimant.
LVDT : les capteurs à transformateur différentiel (LVDT) mesurent les déplacements. Basés sur le principe du champ magnétique, ils ont l'avantage que ce capteur ne subisse aucune usure mécanique mais demande à dériver le signal de position. Gamme couverte : de ± 0,25 mm à ± 500 mm. Ils sont aussi insensibles aux vibrations, aux champs magnétiques externes et sont utilisables en atmosphère humide et chargée d'huile.

■ Principe de fonctionnement du LVDT

Basé sur un champ magnétique émis par le bobinage primaire lui seul alimenté, suivant la position du noyau et donc du déplacement de la cible, une tension plus ou moins élevée se retrouvera au niveau du bobinage secondaire n° 1 ou n° 2.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.



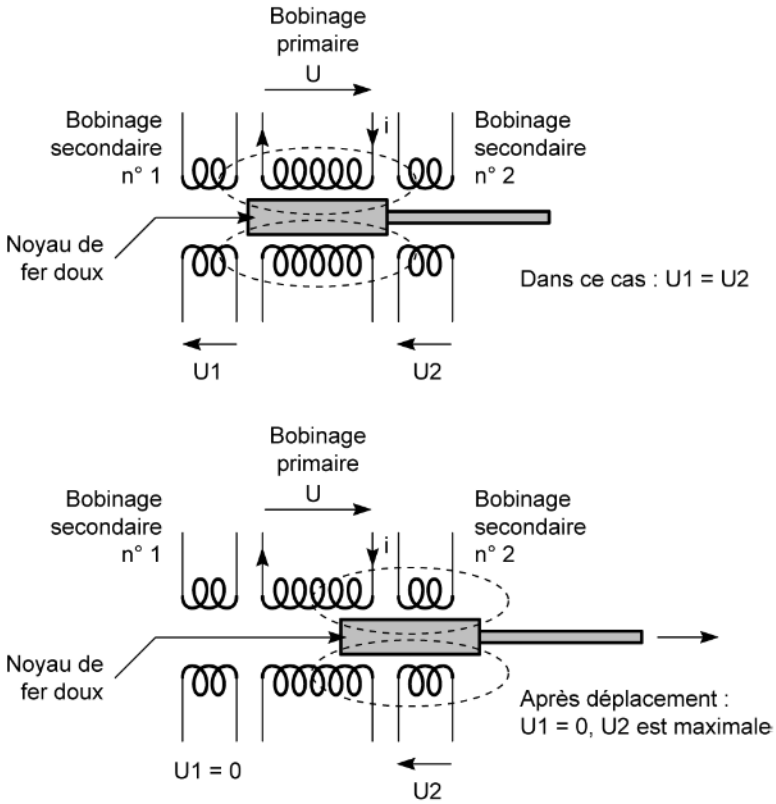


Figure 12.11 – Schématisation du principe de fonctionnement du LVDT.

État 1 : le noyau est au centre, on retrouve les mêmes tensions au bobinage secondaire n° 1 et n° 2.

Après déplacement vers la droite (état 2), la tension du bobinage n° 2 sera maximale alors que celle du bobinage secondaire n° 1 sera nulle. Ensuite on réalise la différence entre U_2 et U_1 pour ne recueillir qu'une tension proportionnelle au déplacement (*figure 12.11*), d'où le terme de différentiel (LVDT).

Il y a linéarité de l'ordre de ± 0,2 % de l'étendue de mesure et ± 0,1 % sur commande.

■ Effet Doppler

Quand on envoie une onde (sonore, ultrasonore, électromagnétique) sur une cible en mouvement, une partie de cette onde est réfléchie vers l'émetteur et subit un décalage de fréquence proportionnel à la vitesse de déplacement de la cible (*figure 12.12*).

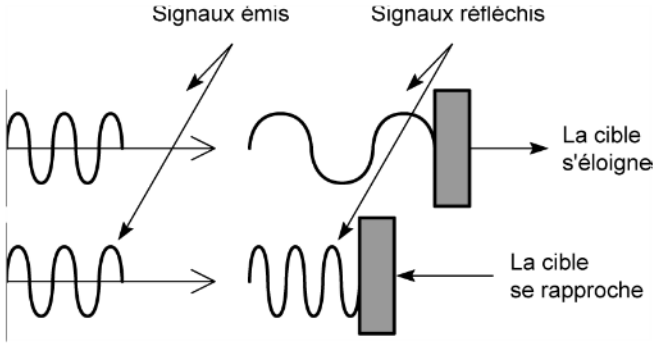


Figure 12.12 – Schématisation du principe de l'effet Doppler.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Les technologies de mesure de vitesse de l'air ne seront pas détaillées, mais on retrouve l'utilisation du principe de la génératrice anémométrique.

L'anémomètre à impulsions inductives, l'anémomètre à hélice où l'on retrouve la tachymétrie par comptage d'impulsions, l'anémomètre à fil chaud où il y a proportionnalité entre l'énergie nécessaire à maintenir constant la température et la vitesse de l'air et l'anémomètre à tube de Pitot où on entretient la proportionnalité de la vitesse de l'air avec une pression différentielle dynamique.

12.3.2 Capteurs de déplacement sans contact

Les capteurs SA1D et MX1C (*figure 12.13*) fonctionnent selon le principe de la triangulation optique. Un faisceau lumineux, visible ou non selon la longueur d'onde, est émis en direction de la cible. La lumière diffusée impressionne une surface sensible. Selon que la cible se trouve en A ou en B, l'impact sera vu en A′ ou en B′.

Le capteur délivre un signal électrique proportionnel à la distance ainsi mesurée. Les technologies optiques fonctionnent idéalement sur des cibles opaques. L'air doit être transparent, la vitesse de mesure peut être élevée (quelques millisecondes).

Le capteur SA6A émet une onde ultrasonore qui est renvoyée par cible ; connaissant la vitesse de propagation de cette onde le capteur détermine la distance parcourue en un temps donné. Les technologies à ultrasons sont insensibles à la couleur de la cible, mais l'onde est véhiculée par l'air. Aussi les mouvements d'air et les variations rapides de température sont-ils nuisibles. Le SA6A pallie ces inconvénients au moyen de la logique floue qui vérifie en permanence de la cohérence des mesures.

La vitesse de mesure est de quelques dizaines de millisecondes.

Le choix du capteur s'effectuera en fonction de l'application envisagée :

– étendue de mesure, résolution et précision souhaitée ;
– caractéristiques de la cible (liquide, solide, colorée, transparente, absorbante, réfléchissante) ;
– conditions environnementales.

En bas, le capteur SA6A est de type ultrason.

Figure 12.13 – Capteur MX1C à faisceau laser (classe III a) (Chauvin Arnoux).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Chaîne de mesure à poste fixe (*figure 12.14*) :

– Détermination du capteur : étendue de la mesure : limite basse et haute des valeurs à mesurer.
– La fréquence ramenée au capteur (tenant compte des rapports d'engrenage, du nombre d'impulsions par tour) doit être compatible avec celui-ci.
– La distance à la cible conditionne le choix du type de capteur : < 10 mm,capteur magnétique, au-delà capteur optique.
– La fréquence issue du capteur doit être dans la plage de mesure de l'appareil situé en aval (convertisseur, afficheur…) ; cet appareil doit permettre la mise à l'échelle (gain, décalage d'origine…).

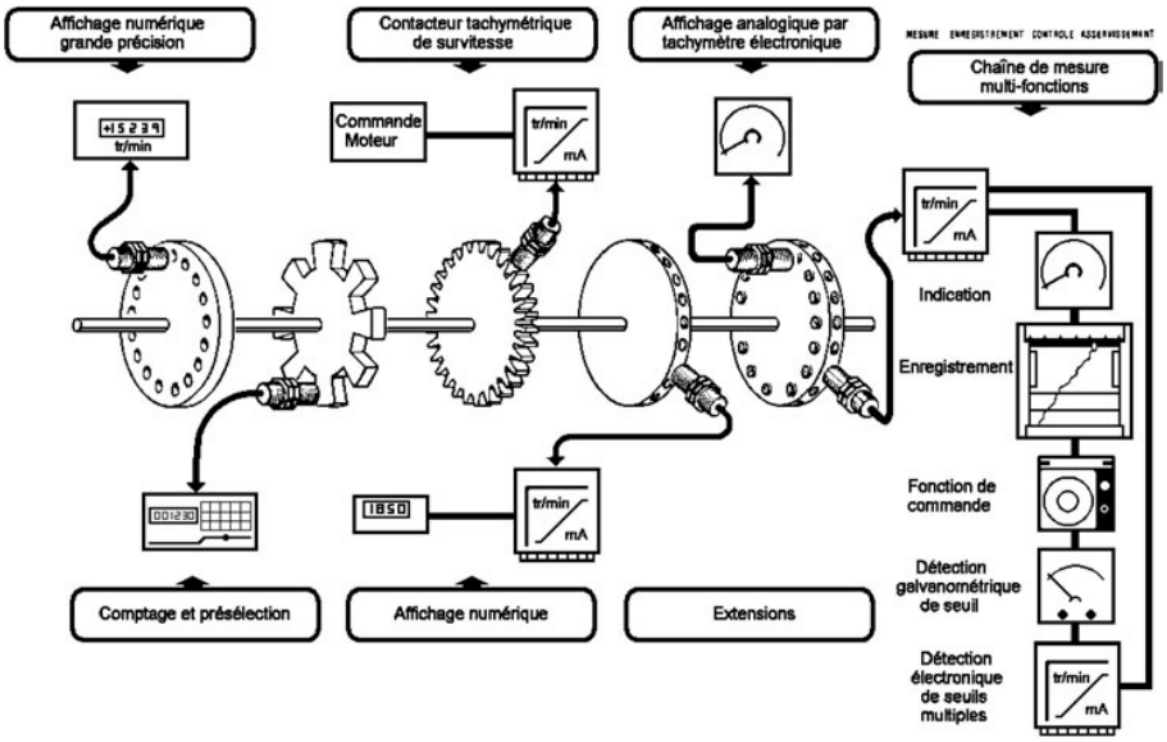


Figure 12.14 – Chaîne de mesure à poste fixe.

Certains indicateurs peuvent être directement raccordés à divers capteurs (inductifs, génératrices à courant continu…), ils intègrent maintenant le convertisseur, l'affichage de divers paramètres (en plus de la vitesse), la programmation de seuils pour l'asservissement du moteur et aussi sa protection par la limitation du nombre de tours. En complément, une sortie RS232 permet, à l'aide d'un logiciel adapté, un traitement informatique des données.

12.3.3 Présentation des capteurs de différentes technologies

■ Tachymètre portable optique C.A 27

Le capteur optique reflex intégré à l'appareil travaille en infrarouge modulé avec démodulation synchrone, ce qui lui donne une très grande immunité aux lumières extérieures.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

13 • MESURES D'APPOINT

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

13.1 Multimétrie

Objectif : il convient de restreindre à un même appareil toutes les fonctions de mesures déjà traiter dans les chapitres : mesure de tension, de courant, de continuité, de résistance, de tests de composants, etc.
Les multimètres ou contrôleurs universels ou encore multimètres pinces représentent les appareils les plus utilisés, en maintenance tertiaire et industrielle.
Applications possibles :

– Mesure de niveaux de tension dans les tableaux de distribution électrique, armoires électromécaniques (*figure 13.1*).

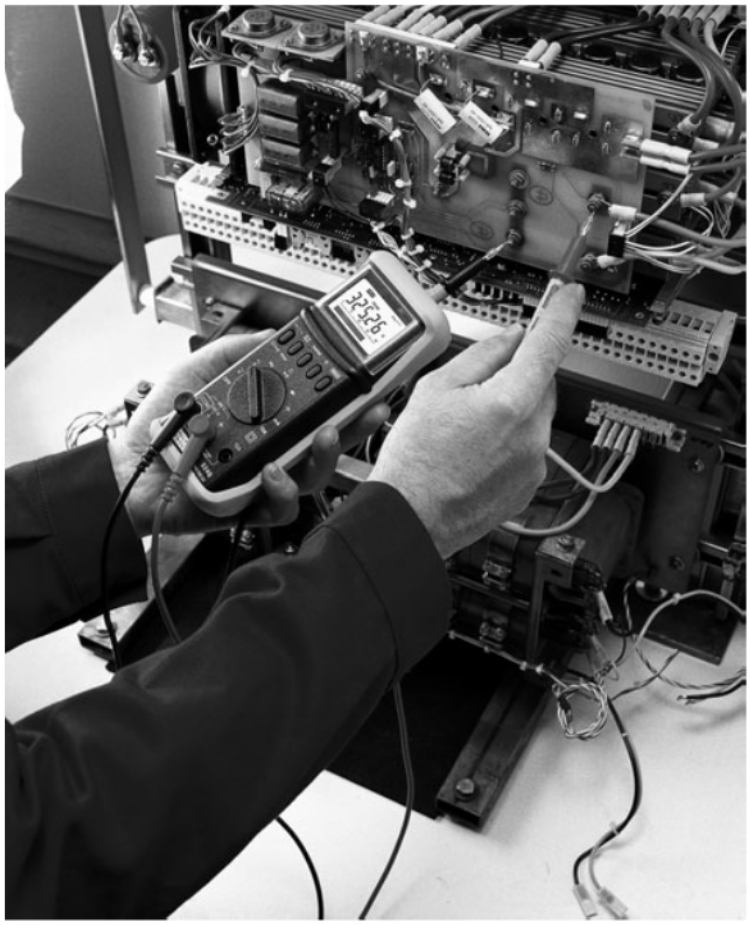


Figure 13.1 – Mesure d'une tension déformée en TRMS à gauche.

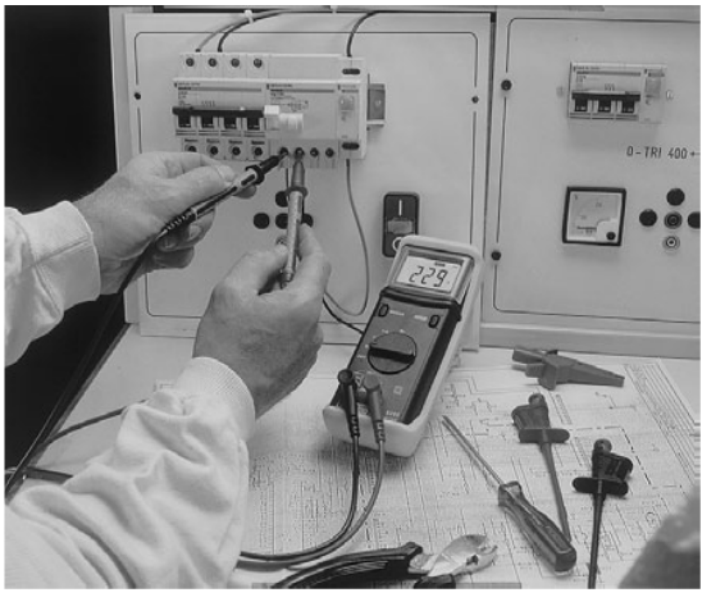


Figure 13.2 – Vérification d'un disjoncteur tétrapolaire.

- Contrôle de 1er niveau (tension, résistance, capacité, fréquence, continuité, test de diode…) de cartes, petites alimentations électroniques.
- Mesures de différents paramètres électriques (courant allant de quelques milliampères à 20 A) sur des installations de chauffage, de climatisation, d'éclairage (*figure 13.2*).
- Diagnostic de 1er niveau en maintenance sur appareils (photocopieurs, téléviseur, petit électroménager).
- Contrôle du bon fonctionnement des coffrets d'alimentation de chantier (triphasé ou monophasé) coffrets de télécommande d'alarme…
- Maintenance préventive de moteurs (AC et DC).

13.1.1 Différences entre les multimètres analogiques et numériques, définition de la précision

Voici quelques rappels sur l'utilisation des multimètres.

■ Multimètres analogiques

Classe de précision : la classe de précision caractérise la précision relative de l'appareil de mesure. Elle fournit les limites, en plus ou en moins, de l'erreur garanties en pourcentage de la valeur finale de la plage de mesure.
L'**erreur absolue** maximale en tout point de la lecture est définie par :

$$\Delta V = \frac{\text{classe}}{100} \text{ calibre (V)}$$

ΔV est l'incertitude constante de lecture de part et d'autre de la tension lue.
Exemple : pour un voltmètre de classe 2,5 sur le calibre 100 V :

$$V = \frac{2{,}5 \times 100}{100} = \pm 2{,}5 \text{ V}$$

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

L'**erreur relative** (*figure 13.5*) traduit la précision de mesure, elle s'exprime en % :

$$\varepsilon(\%) = \frac{\Delta V . 100}{V_{\text{lue}}}$$

Un exemple de **calcul d'erreur** est présenté à la *figure 13.3*.

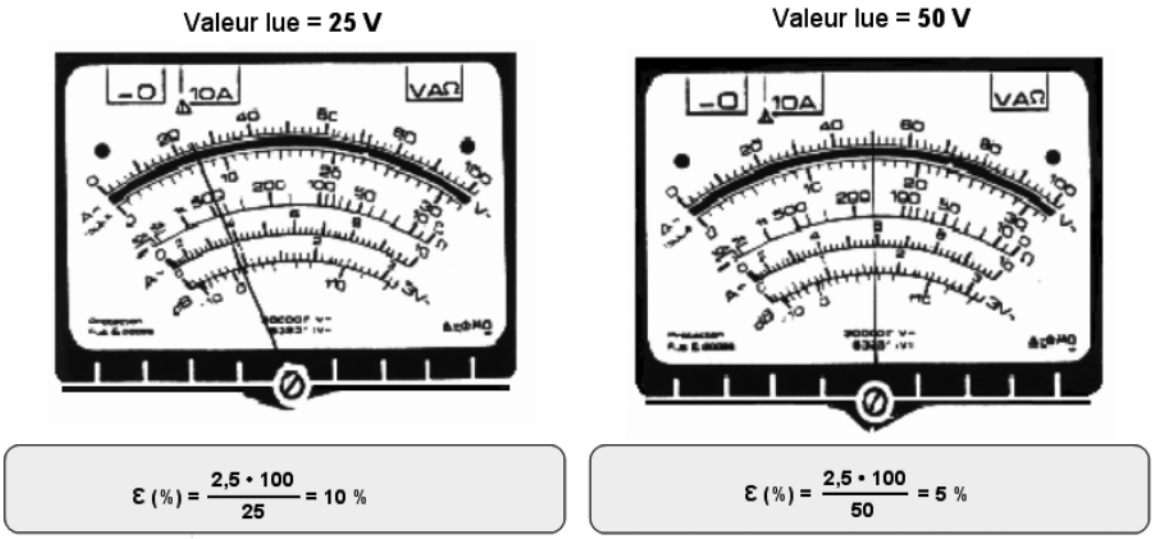


Figure 13.3 – Exemple de calcul d'erreur relative.

On considère que dans le dernier tiers de l'échelle l'erreur de mesure est faible, donc la valeur mesurée est précise (*figure 13.4*).

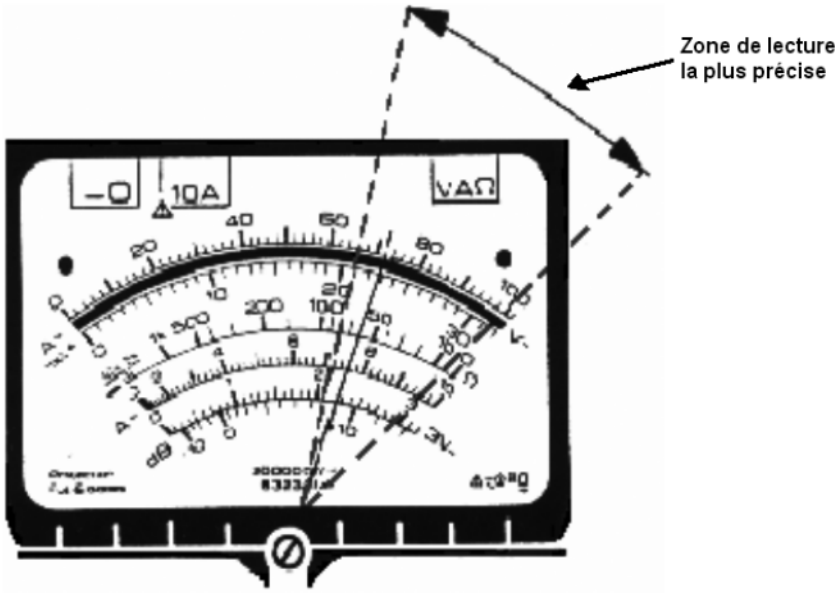


Figure 13.4 – Zone de lecture préconisée en raison de la précision de l'appareil.

Classification des appareils de mesures : *tableau 13.1*.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

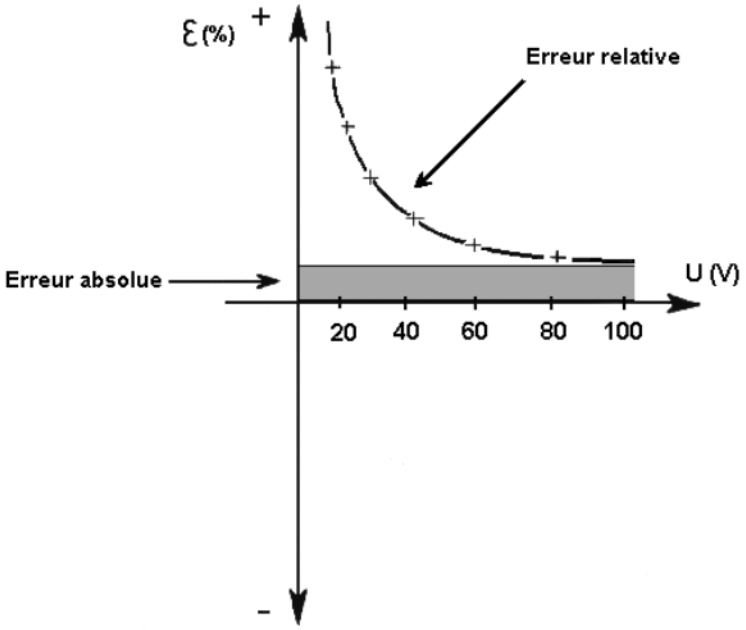


Figure 13.5 – L'erreur relative diminue si la valeur lue se rapproche de la pleine échelle.

Tableau 13.1 – Classes de précision.

Appareils de mesures	Classe de précision	
	de l'appareil	de l'accessoire
Appareil de mesures de précision	0,1	0,05
	0,2	0,1
	0,5	0,2
Appareil de mesures de service	1	0,5
	1,5	0,5
	2,5	1
	5	1

■ Multimètres numériques

Résolution : la résolution est le plus petit écart décelable par un appareil de mesure numérique.

Exemple :

– Afficheur 2 000 points, calibre utilisé 1 V.
– Mesure : 1 V pleine échelle affiche « 1.000 ».
– La mesure de la plus petite valeur sur ce calibre de 1 V affiche « .001 », soit 1 mV.
– La résolution sera donc de 1 mV sur le calibre 1 V.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Précision : elle est généralement donnée en % de la lecture avec plus ou moins une erreur constante qui s'exprime en unité « digit » (*figure 13.6*). Attention, cette précision est parfois exprimée « % de l'échelle ».

V DC et AC (1)	2 V	20 V	200 V	600 V(2)
Résolution	1 mV	10 mV	100 mV	1 V
Précision(3)	± 2 % L ± 1 pt en DC et ± 3 % L ± 5 pts en AC			
Surcharge admissible	1 000 V eff. pendant 5 secondes			

(1) Domaine d'utilisation en AC : 10 Hz à 400 Hz sinusoïdal (Bande passante).
(2) Affichage 2 000 points limité à 600 V_{eff}.
(3) Précision en % de la lecture à ajouter ou à soustraire.

La précision → Erreur de mesure maximum : (± 2 % en DC)
→ Erreur de base : (± 1 point en DC)

Figure 13.6 – Exemple de calcul d'erreur sur un multimètre numérique.

Exemple de calcul :
Afficheur 2 000 points, précision ± 1 % de la lecture, ± 2 points, résolution 0,01 V.
Calibre utilisé 20 V, on mesure 10 V.
L'écart de mesure est donc ± 0,1 V et ± 0,02 V soit :

$$10 \text{ V} \pm (0{,}1 + 0{,}02)$$

Résultat : la mesure se situe entre 9,88 V et 10,12 V.
La différence essentielle concernant la tolérance de mesure sur les multimètres numériques est que l'erreur relative en % est pratiquement constante dans toute la plage de mesure, c'est-à-dire que l'erreur de mesure relative ne dépend pas de la valeur mesurée *(figure 13.7)*.

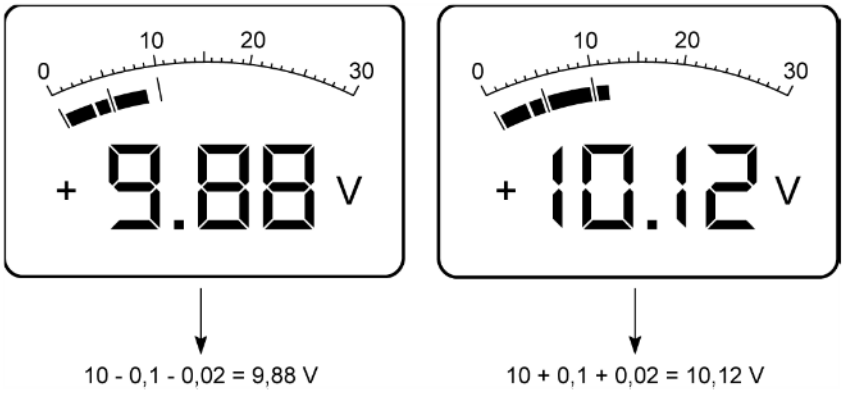


Figure 13.7 – Exemple de mesure en prenant en compte la précision de l'appareil.

■ Comparatif des mesures analogiques et numériques

□ Avantages de l'analogique

Perception immédiate de la mesure.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Affichage stable si signaux parasites.
Résistance d'entrée faible de 5 à 40 kΩ/V (idéal pour les électriciens).
Autonomie totale (sauf sur position ohmmètre).

□ **Avantages du numérique**

Précision élevée : 0,1 %, 0,01 %.
Très grande résolution.
Impédance d'entrée élevée 10 MΩ (idéal pour les électroniciens).
Grande facilité de lecture.
Robustesse (pas de mécanisme).

13.1.2 Mesurages des différentes grandeurs

■ **Mesure de la valeur moyenne**

Définition : la valeur moyenne du courant $i(t)$ est l'intensité moyenne (notée $<I>$ ou $\bar{I}$) que devrait avoir un courant continu (donc constant) pour transporter la même quantité d'électricité que $i(t)$ pendant le même temps.

$$<I> = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\,\mathrm{d}t$$

Principe de la mesure : la mesure d'une grandeur alternative sinusoïdale est effectuée par un redressement monoalternance, puis par un filtrage (*figure 13.8*).

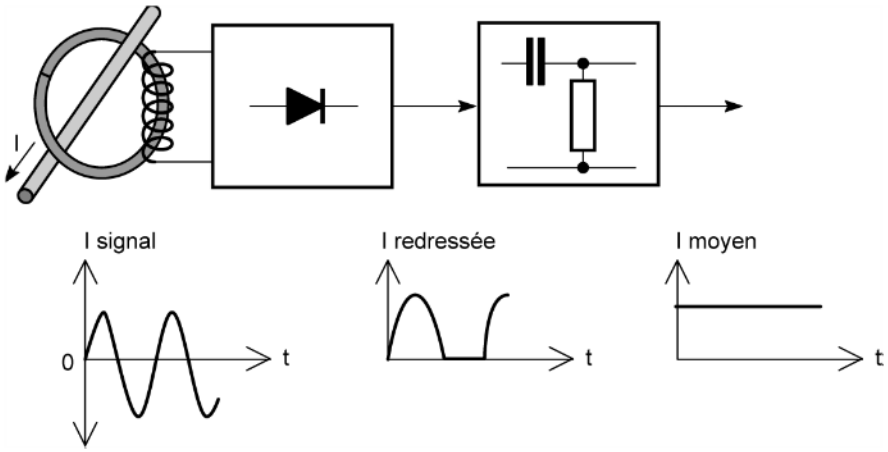


Figure 13.8 – Représentation schématique de la mesure de la valeur moyenne.

■ **Mesure de la valeur efficace**

Définition : la valeur efficace du courant $i(t)$ est l'intensité moyenne (notée I ou I_{eff}) que devrait avoir un courant continu (donc constant) pour produire, la même quantité de chaleur que $i(t)$ dans la même résistance durant le même temps.

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,\mathrm{d}t}$$

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Principe de la mesure : la mesure d'une grandeur alternative sinusoïdale est effectuée par un redressement monoalternance, puis filtrée et ensuite affectée d'un coefficient 1,1 pour donner la valeur efficace (*figure 13.9*).

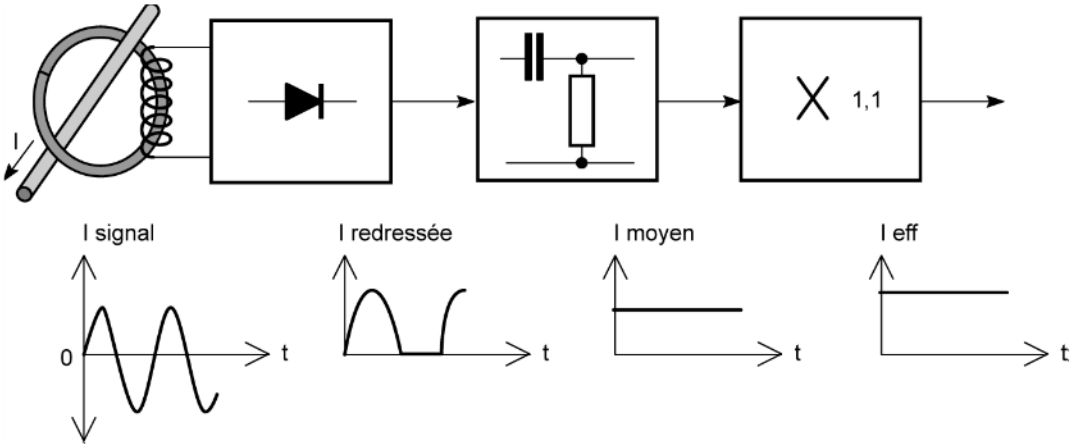


Figure 13.9 – Représentation schématique de la mesure de la valeur efficace.

Pour un courant ou une tension alternative sinusoïdale (*figure 13.10*) :

$$I_{max} = I_{eff}\sqrt{2}$$

$$<I> = \frac{2\,I_{max}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}\,I_{eff}}{\pi} = 0{,}9\ I_{eff}$$

$$I_{eff} = \frac{\pi <I>}{2\sqrt{2}} = 1{,}11\ <I>$$

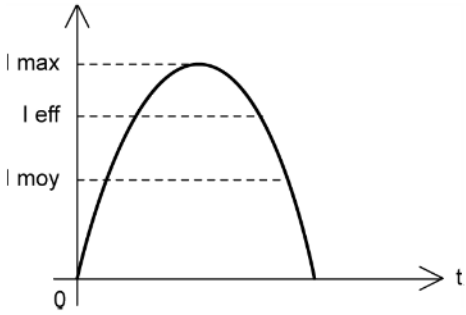


Figure 13.10 – Représentation des grandeurs mesurées sur un relevé de courant.

Par calcul analogique, les opérations suivantes sont réalisées : *figure 13.11*.

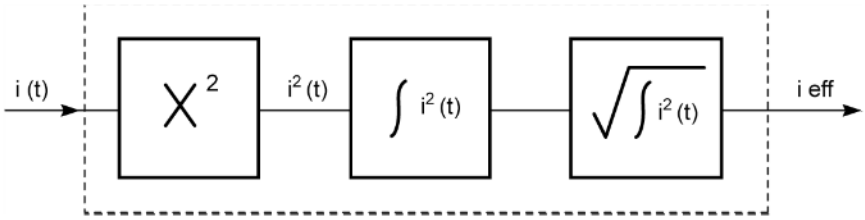


Figure 13.11 – Schémas blocs des opérations pour calculer la valeur efficace d'une grandeur en analogique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Par échantillonnage numérique : *figure 13.12*.

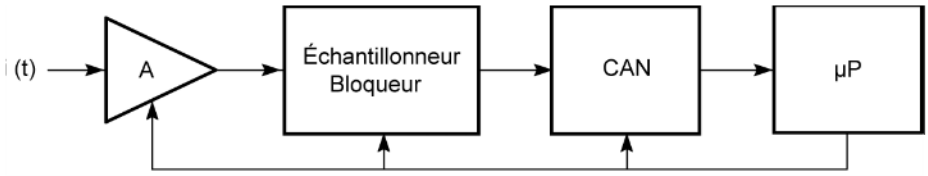


Figure 13.12 – Schémas blocs des opérations pour calculer la valeur efficace d'une grandeur en numérique.

Attention ! Précautions à prendre pour un **signal non sinusoïdal** : il faut mesurer la valeur efficace vraie.
Si le signal n'est plus sinusoïdal comme c'est le cas en électronique de puissance, celui-ci peut se décomposer en série de Fourier telle que :

$$i(t) = \langle I \rangle + I_1\sqrt{2}\sin(\omega t - 1) + I_2\sqrt{2}\sin(\omega t - 2) + \ldots$$

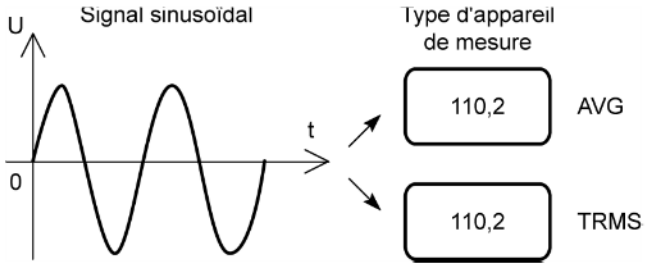
$\langle I \rangle$ = valeur moyenne du signal.
I_1 = valeur efficace du fondamental (harmonique de rang 1).
I_2 = valeur efficace de l'harmonique de rang 2.
La valeur efficace vraie du signal doit tenir compte de tous les *harmoniques* :

$$I\text{eff} = \sqrt{\langle I \rangle^2 + I_1^2 + I_2^2 + \ldots}$$

Les appareils numériques actuels sont équipés de circuit de calcul TRMS (*True Root Mean Square*) afin de mesurer exactement la valeur efficace vraie. Ces types de mesures tiennent compte de l'ensemble des composantes alternatives et continues (AC, AC + DC).
Comparaison d'une mesure effectuée avec un appareil type *Average* (valeur moyenne) et un appareil TRMS :

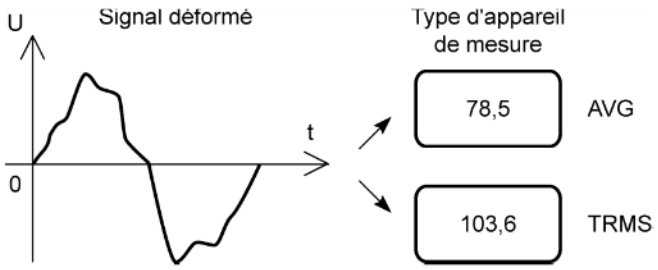
– Sur un signal sinusoïdal, on obtient le même résultat : *figure 13.13*.

Figure 13.13 – Comparaison de mesures effectuées d'une tension sinusoïdale.



– Sur ce signal déformé, les deux types d'appareil affichent une différence de 30 et 50 % entre les deux valeurs lues : *figure 13.14*.

Figure 13.14 – Comparaison de mesures effectuées d'une tension non sinusoïdale.



Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Rappel sur le facteur de crête

Définition : le facteur de crête est le ratio de la valeur maximale sur la valeur efficace du signal, il permet d'apprécier qualitativement la déformation d'un signal suivant la valeur de ce facteur :

$$Fc = \frac{\text{valeur max (1/2 période)}}{\text{valeur RMS}}$$

Exemple pour un courant :

$$Fc = \frac{I\ \text{max (1/2 période)}}{I\text{RMS}}$$

Un signal sinusoïdal aura un facteur de crête de $\sqrt{2}$ alors qu'un signal déformé verra son facteur de crête augmenter et devenir nettement supérieur à cette valeur (*figure 13.15*).

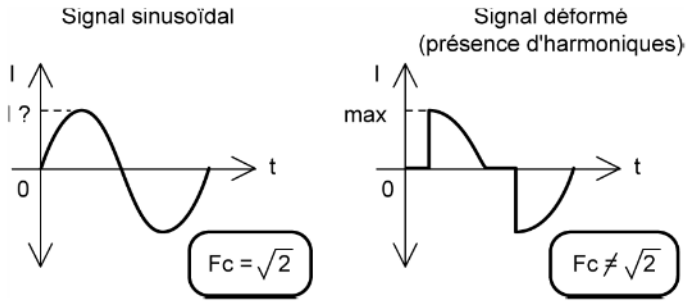


Figure 13.15 – Comparaison de mesures du facteur de crête suivant le type de signal.

■ Exemple des fonctionnalités de certains multimètres

- Une mesure de tension au moins jusqu'à 600 V et en courant jusqu'à 10 A.
- TRMS (par exemple MX24 : 750 V TRMS et 10 A TRMS).
- Mesurer de résistance (40 MΩ), de continuité avec bip sonore, de fréquence (400 kHz), de capacité (40 µF) et test de diodes.
- Des fonctions Min/Max/AVG et AUTOMEM.
- Un système de trappe à pile et fusible accessibles en toute sécurité.
- Une ergonomie très fonctionnelle (format caisse à outils… gaine antichoc et utilisation possible avec des gants isolants).
- Un système de rétro-éclairage du grand afficheur (5 000 points).
- Touche RANGE, AC/DC.
- Possibilité de raccorder une pince ampèremétrique de courant (genre MX23).
- Position basse impédance d'entrée en Volts (V low Z, soit Ze = 270 kΩ).
- Entrée ADP pour le raccordement de capteurs (ampèremétrie, tachymétrie, température…).
- Facteur de crête.

13.1.3 Méthodologie

Le multimètre se branche suivant les fonctions utilisées et trivialement comme tout appareil voltmètre et ohmmètre (en parallèle), ampèremètre (en série)…

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

13.1.4 Appareillages

On recense chez tous les constructeurs trois niveaux de gamme de multimètre :

- gamme pour une maintenance de 1er niveau (*figure 13.16*) ;
- gamme analogique/numérique ;
- gamme numérique et graphique et avec liaison PC pour un traitement par logiciel des mesures.

Figure 13.16 – Multimètre pour une maintenance de 1er niveau (Fluke).

Tableau 13.2 – Caractéristiques de la gamme Fluke.

	10	11	12/12B	16
Affichage numérique 4 000 points	●	●	●	●
V Chek™		●	●	●
Capacités		1,000 µF-10 000 µF	1,000 µF-10 000 µF	1,000 µF-10 000 µF
Enregistrement des Min/Max avec temps relatif			●	●
Capture de la continuité™			●	●
Test de diode	●	●	●	●
Signal sonore de continuité rapide	●	●	●	●
Mode veille automatique	●	●	●	●
Température				●
Microampères				●

Fonction V Chek™ (11, 12 et 12B seulement): simplifie la mesure des sources d'énergies et des alimentations. En mode résistance/continuité, si une tension supérieure à 4,5 volts est appliquée aux bornes d'entrée (intentionnellement ou non), l'instrument passe automatiquement en mode veille DC ou tension AC (selon la valeur la plus importante). L'impédance d'entrée est ramenée à environ 2 kΩ pour permettre de déterminer si la mesure correspond à une tension effective ou à une tension de fuite. Ce mode protège également l'appareil si une tension est accidentellement appliquée lors de la mesure de résistances

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 13.3 – Caractéristiques de la gamme Fluke en TRMS.

	83	85	87/87E	787
Résolution de l'affichage numérique	4000	4000	4000; 20 000	4 000; 30 000 pour courant DC
Affichage analogique	Bargraphe 43 segments	Bargraphe 43 segments	Pointeur analogique	% échelle 4-20 mA
Mesure de tensions AC/DC (jusqu'à 1000V)	●	●	●	●
Mesure d'intensités AC/DC (jusqu'à 10A*, tout fusible)	●	●	●	1 µ à 1A*
Génération, simulation, rampe et escalier d'intensités jusqu'à 20 mA	N/A	N/A	N/A	●
Résistances	●	●	●	●
Fréquences et rapports cycliques	●	●	●	Fréq.uniquement
Capacités	●	●	●	N/A
Test de continuité et de diodes	●	●	●	●
Tensions et courants AC efficaces vrais	N/A	●	●	●
Mode d'enregistrement valeurs Min/Max et moyenne	●	●	●	●
Mode Touch Hold™ & mode Relatif	●	●	●	●
Boîtier étanche aux proj. et poussière Etui de protection avec sup. Flex Stand	●	●	●	●
Protection anti-IEM renforcée	●	●	●	●
Ecran rétro-éclairé	●	●	●	●

* 10A en continue, 20A pendant 30 secondes. Pour le modèle 787, 0,44A en continue, 1A pendant 30 secondes

Les multimètres « tout numérique » de Fluke, adaptés au travail de l'ingénieur ou du technicien dans les domaines audio, vidéo ou télécommunications, possèdent des fonctions de mesures spécifiques comme :

– fréquences ;
– fonction dB (référencer à 600 Ω) qui permet de mesurer le gain ou l'affaiblissement en dB des amplificateurs, des filtres, des atténuateurs ;
– résistance faible niveau…

Les multimètres graphiques forment une nouvelle catégorie d'instruments de test, alliant les fonctions les plus avancées des multimètres à la puissance visuelle de l'affichage des tendances et des formes d'ondes avec test de composants *in situ* et détection d'activité logique. Le tout dans un instrument portable et simple d'utilisation.

Certains multimètres spécifiques sont dédiés à la maintenance automobile tel le Fluke 88V intégrant en plus des mesures courantes, les mesures de température, de pression, de vide, de fréquence, de rapport cyclique et de test de diode.

D'autres sont étanches à l'eau et aux polluants et répondent aux exigences militaires (norme MIL SDT 28800), comme le Fluke 27, sont utilisables en atmosphère potentiellement explosive (ATEX) étant à sécurité intrinsèque comme le Fluke 87V Ex (ATEX II) ou le MX 57 Ex de Metrix (*figure 13.17a*). Ces modèles sont prisés par les industries pétrochimique, minière, pharmaceutique, pétrolifère…

Certains autres sont de très grande précision (résolution d'un million de points) et adaptés aux applications sur bancs d'essai et systèmes, comme le Fluke 8845A avec ses fonctions analytiques, mathématiques, son logiciel d'acquisition FlukeView® son port USB…

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Sécurité

Toutes les entrées sont protégées selon la norme EN 61010-1 cat. III 1000 V et certifiés UL et TUV.

Tableau 13.4 – Caractéristiques de la gamme Metrix (Chauvin Arnoux).

Caractéristiques	MX 26	MX 24B	MX 23	MX 22	MX 21	MX 44	MX 20
Résolution	5 000			4 000	2 000	4 000	2 000
Nature de la mesure	TRMS AC+DC			Moyenne		Moyenne	
Fonctions	MIN / MAX / PEAK AUTOMEM	MIN / MAX AUTOMEM	AUTOMEM	MIN / MAX / MEM	MEM	REL / HOLD	HOLD
Afficheur	Rétroéclairage - Bargraphe		Bargraphe		-	Bargraphe	-
TENSIONS DC, AC et AC+DC							
Gammes	0,5 à 1000 V			40 mV à 600 V	20 mV à 600 V	400 mV à 1000 V	200 mV à 1000 V
Précision de base DC	0,3%L+2D				1%L+4D	0,3%L+1D	0,5%L+4D
Bande passante utile	40 Hz à 100 kHz	40 Hz à 1 KHz		40 à 500 Hz*		40 Hz à 1 kHz	40 à 500 Hz
Précision de base AC et AC+DC	1%L+3D	1,5%L+2D	1,5%L+3D	1%L+4D	1,5%L+8D	0,8%L+3D	1%L+8D
COURANTS DC, AC et AC+DC							
Gammes	500 mA à 10 A		-	400 µA à 10 A	-	40 mA à 10 A	20 mA à 10 A
Précision de base DC	0,3L%L+2D		-	1%L+3D	-	0,8%L+2D	1,2%L+1D
Bande passante utile	40 Hz à 30 kHz	40 Hz à 1 kHz	-	40 à 500 Hz	-	50 Hz à 1 kHz	40 à 500 Hz
Précision de base AC et AC+DC	1,5%L+2D		-	1,2%L+5D	-	1,2%L+4D	1,5%L+8D
RÉSISTANCES							
Gammes	500 Ω à 50 MΩ			400 Ω à 40 MΩ	200 Ω à 20 MΩ	400 Ω à 40 MΩ	200 Ω à 20 MΩ
Précision de base	0,3%L+3D			0,5%L+4D	1%L+4D	0,3%L+4D	0,8%L+4D
CONTINUITE + TEST DIODE	Oui					Oui	
CAPACITES	50 nF à 50 mF			-		4 nF à 40 µF	-
PARTICULARITÉS	Liaison optique de série. Entrées VlowZ et ADP 500 mV	Entrées VlowZ et ADP 500 mV		Fréquence 4 kHz à 40 MHz	Lecture directe en courant (mesure avec pince)	Protection en tension 1100 V crête Boîtier IP67	
Sécurité IEC 61010	Cat. III, 600 V					Cat. III, 600 V	Cat. II, 600 V
Dimensions - Masse	35 x 85 x 170 mm - 300 g					40 x 82 x 189 mm - 400 g	
Garantie	3 ans		1 an		3 ans		
Accessoires fournis	1 gaine élastomère (HX0002 =MX21 et MX22) - (AE0237 = MX 23 et MX 24B) - (HX0010 = MX 26), 1 jeu de 2 cordons de sécurité, 1pile 9 V installée et 1 notice de fonctionnement					1 jeu de 2 cordons de sécurité, 1 pile 9 V installée, 1 fusible de rechange (MX 44) et 1 notice de fonctionnement	
Pour commander	MX0026-G	MX0024BG	MX0023-G	MX0022-Z	MX0021-Z	MX20	MX44B
Options	Tous les MX Concept existent en version "L", avec mallette				MX0021-W (+ pince)	-	

* 40 À 100 Hz sur calibre mV

Des multimètres sont utilisables en thermomètre numérique, comme le Tektronix TX3 qui peut recevoir un thermocouple de type K (*figure 13.17 b*).

Des multimètres sont prévus pour recevoir des pinces ampèremétriques AM 89, comme le Metrix MX21 pour donner, vu son étendue de mesure et le calibre de la pince, une valeur de courant faible directement en A ou en mA. Son étendue de mesure est de 240 A AC.

Certains multimètres, qualifiés de « multiscope », combinent les fonctions de multimètres TRMS 4 000 points et d'oscilloscope pour un prix intéressant (par exemple gamme EXTECH).

Les pinces multimétriques offrent l'avantage d'être compactes, de mesurer un courant AC/DC jusqu'à 1 000 A TRMS, une tension jusqu'à 600 V, la continuité, la résistance avec des dimensions adaptées aux endroits les plus étroits.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 13.17 – Multimètres **(a)** Metrix et **(b)** Tektronix.

Figure 13.18 – **(a)** Pince multimétrique Fluke 337.
(b) Multimètre numérique de poche Metrix MX 24B.

Citons par exemple les pinces multimétriques Fluke 337 (*figure 13.18 a*) ou F11N, F15 ou F03 de Chauvin Arnoux.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

13.1.5 Organigramme de choix d'un multimètre

La norme s'appliquant à ces appareils est la norme CEI 61010-1 cat. III 600 V pol. 2 (voir rappel sur les normes) ou CEI 61010 cat. III 1000 V pol. 2 suivant le type d'appareil. Cette norme n'est qu'une évolution élargie et harmonisée de l'ancienne norme CEI 348.

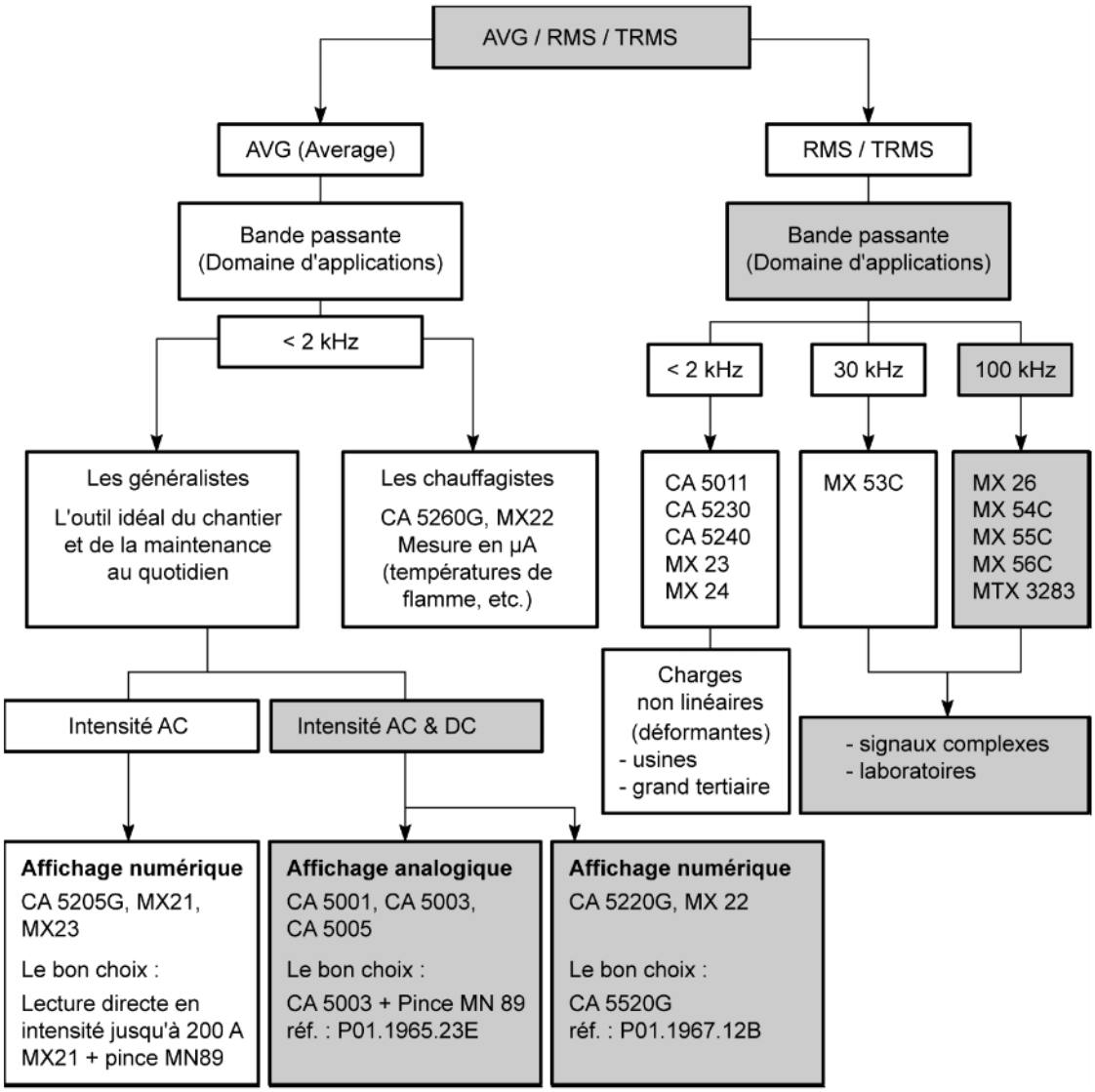


Figure 13.19 – Choix d'un multimètre.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

13.2 Mesure de continuité

13.2.1 Pourquoi mesurer la continuité ?

La NFC 15-100 recommande de faire la mesure avec un courant de 200 mA DC, dans les deux sens, sous une tension à vide de 4 à 24 V afin de contrôler la résistance du conducteur de masses (PE). Étant chargé d'écouler les courants de défauts à la terre, sa résistance ne doit pas dépasser 2 Ω. Dans le cas contraire, le courant de défaut risque d'être d'une valeur inférieure à celle permettant le déclenchement

du ou des disjoncteurs (voir les rappels sur les schémas de liaisons à la terre) et par là même d'éliminer toute protection.

13.2.2 Applications

– Test et vérification des schémas de liaisons à la terre TT et IT.
– Dépannage des armoires ou TGBT.

13.2.3 Méthodologie

Objectif de la mesure : vérifier que le PE n'est pas coupé et inférieur en résistance à 2 Ω

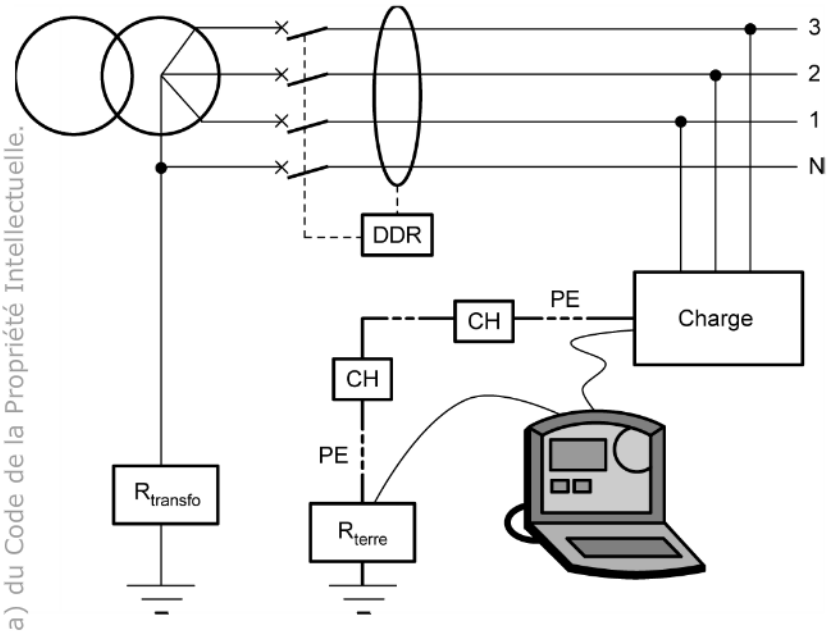


Figure 13.20 – Mesure sur le terrain à l'aide du contrôleur de terre.

Le cordon de mesure tripode (L, N, PE) terminé par des pinces crocodiles ou pointes de touche permet d'intervenir directement sur les conducteurs électriques (*figure 13.21*).

Figure 13.21 – Exemple d'intervention dans une armoire électrique C.A 6115.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 13.5 – Justification et caractéristiques de l'essai effectué.

Pourquoi vérifier la continuité ?	Avec le C.A 6114
Un conducteur PE en bon état et raccordé correctement à la barrette de terre écoulera les défauts à la terre	+ Tension d'essai : 18 VDC + I nominal > 200 mA jusqu'à 10 Ω + Gamme : 0,10 Ω à 2 kΩ + Signal sonore de continuité + Résolution : 0,01 à 1 Ω + Précision = (5 % mesure + 4 points)

Appareillages

Tous les appareils décrits ci-dessus C.A 6115, C.A 6114, Metrix 4940 assurent la fonction mesure du conducteur de protection PE mais aussi tous les multimètres comportant une fonction ohmètre capable de mesurer une valeur inférieure à l'Ohm.

Choix d'un testeur de continuité

Critères de choix :

– les autres fonctions à associer ;
– le type d'affichage souhaité et l'information voulue (sonore et/ou visuelle).

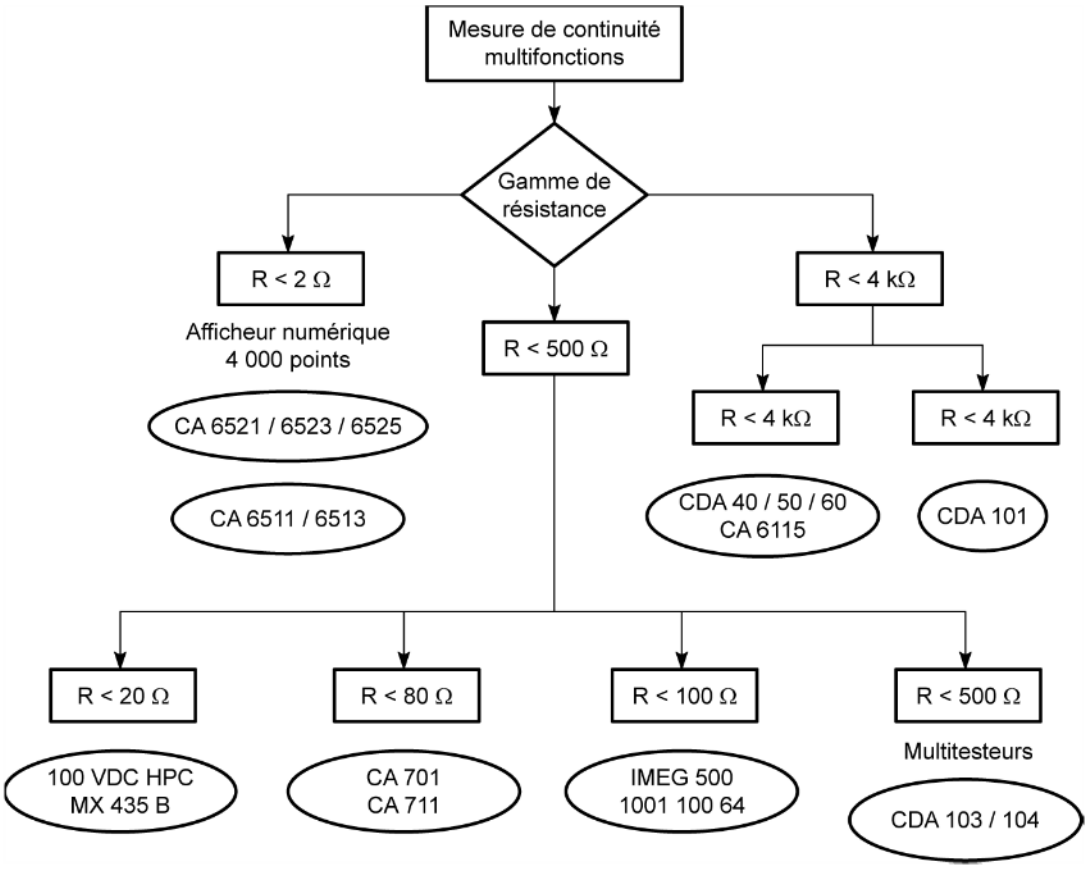


Figure 13.22 – Organigramme de choix d'un testeur de continuité.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ **Normes**

Nouvelle norme CEI/EN 61557.

13.3 Détection de câbles et de conducteurs

■ **Objectif**

Localiser précisément un câble à distance et sans démontage de l'installation, mais aussi détecter la présence d'un court-circuit ou la rupture d'un conducteur à travers les murs, les sols, les plafonds.

■ **Applications possibles**

– Trouver l'origine d'un circuit.
– Suivre un câble tout au long de son parcours.
– Identifier un câble parmi d'autres dans un toron, une goulotte.
– Localiser un court-circuit.
– Diagnostiquer une coupure de circuit.
– Identifier un fusible défectueux à remplacer.
– Effectuer un suivi des circuits de terre.
– Mettre à jour des plans et des schémas très rapidement (normes ISO, sécurité…).

■ **Description du principe de fonctionnement**

Il existe deux types de localisateurs de câbles et de défaut :

– installation sous tension ou alimentée par pile 9 V pour les nouvelles installations encore non alimentées ;
– installation hors tension.

L'appareil se décompose en deux parties :

□ **Pour une installation sous tension**

Émetteur

Branché sur le circuit à contrôler, il consomme un courant pulsé à une fréquence de 3,5 kHz. Du fait de sa faible consommation moyenne (< 5 mA), l'émetteur peut être branché entre une phase du circuit à tester et la terre, sans risque de faire disjoncteur les différentiels (≤ 30 mA).

Récepteur

Sensible uniquement au champ magnétique crée par le courant spécifique de fréquence de 3,5 kHz de l'émetteur, ce récepteur délivre un double signal : lumineux (rampe à Led) et sonore proportionnel à la distance le séparant du conducteur recherché.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

□ Pour une installation hors tension

Émetteur

Il se branche sur une alimentation auxiliaire ou extérieure de 7 V à 250 V AC, il génère une tension pulsée à 3,5 kHz (tension sans danger pour l'utilisateur).
Cette tension est injectée au circuit à contrôler via le cordon d'injection.

Récepteur

Sensible uniquement au champ magnétique crée par la tension spécifique de l'émetteur, il délivre un signal sonore et visuel proportionnel à la distance qui le sépare du conducteur recherché.

Remarque
Il est évident que le câble recherché ne doit pas passer dans un tube métallique et dans le cas d'une installation blindée, cet appareil se trouve inefficace.

Points forts :
- Simple d'utilisation.
- La détection se fait à une distance de 1 m et, pour les sols, les plafonds et les murs, à une profondeur de 50 cm.
- Le double signal lumineux et sonore est proportionnel à la distance du conducteur recherché : plus la distance est faible et plus le signal devient fort.
- Le réglage de la sensibilité de détection permet d'affiner cette recherche.

13.3.1 Méthodologie pour localiser de câble

Connecter l'émetteur soit entre phase et terre, soit sur une phase suivant le modèle utilisé.
Suivre avec le récepteur en appuyant sur le bouton de sensibilité adéquat (de 1 à 5) puis remonter le long du câble jusqu'à identifier son départ au tableau.

■ Méthodologie sur une installation sous tension

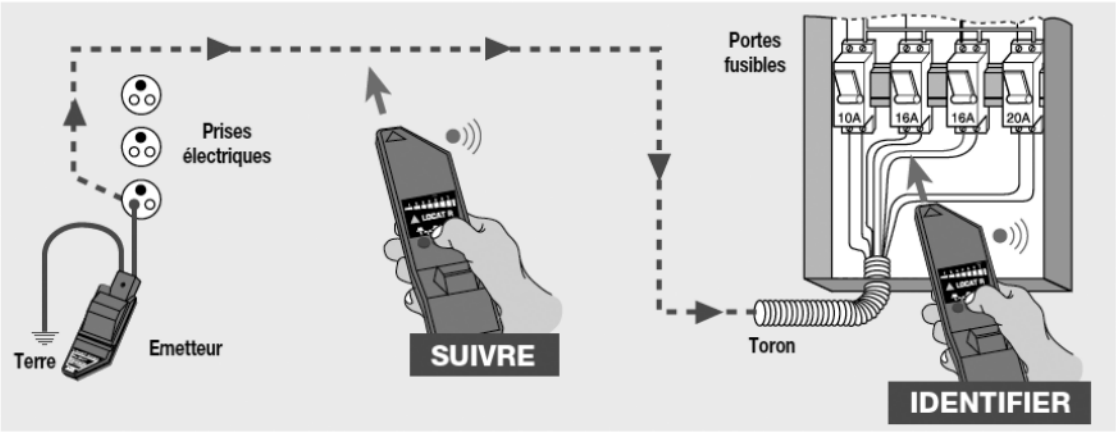


Figure 13.23 – Suivi d'un conducteur alimentant une prise donnée à travers les murs et identification du coupe-circuit correspondant. L'installation est sous tension.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

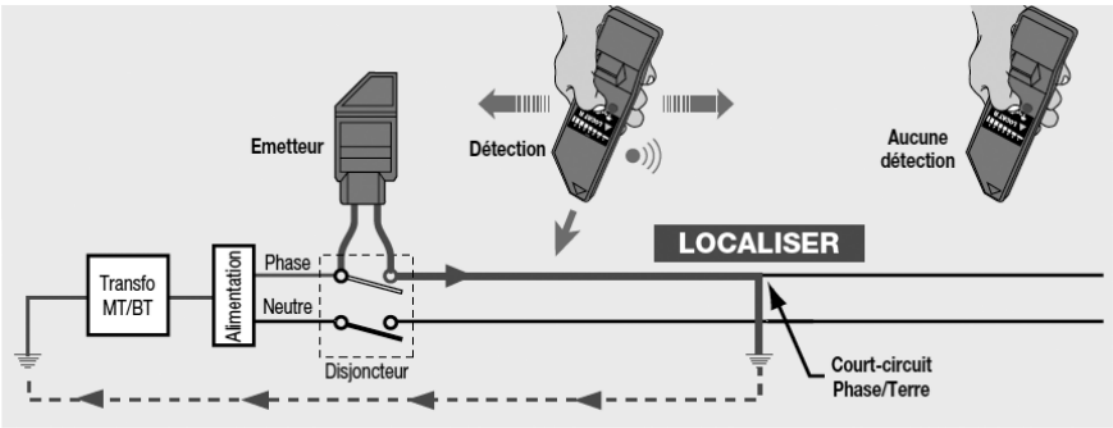


Figure 13.24 – Localisation précise d'un court-circuit (phase/terre par exemple). L'émetteur est branché, côté phase, aux bornes du disjoncteur différentiel.

Méthodologie sur une installation hors tension

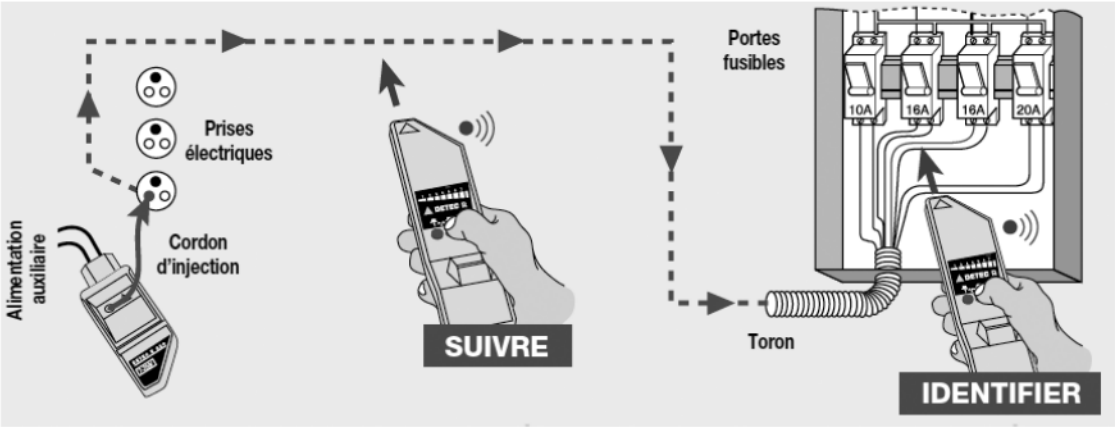


Figure 13.25 – Suivi d'un conducteur alimentant une prise donnée à travers les murs et identification du coupe-circuit correspondant. L'installation est hors tension.

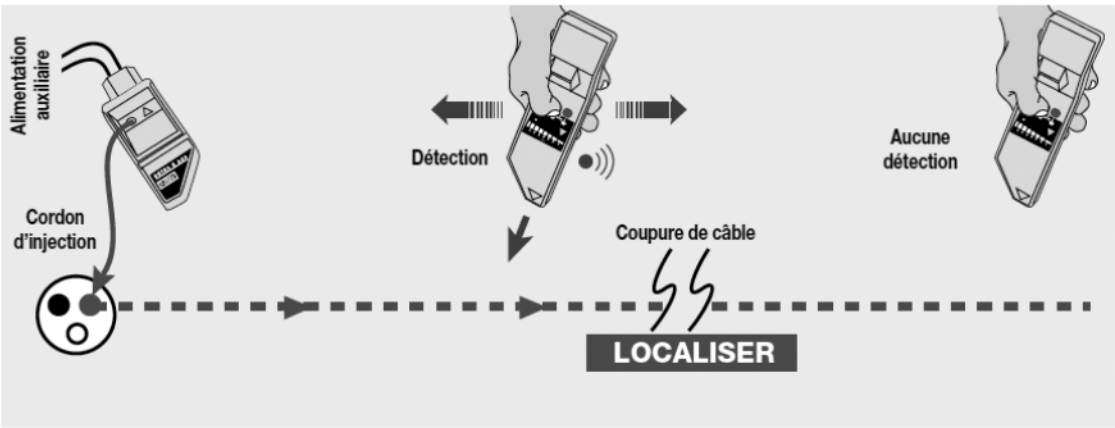


Figure 13.26 – Localisation précise d'une coupure de circuit. L'émetteur est branché côté phase, l'opérateur constate l'arrêt du signal sonore. L'installation est hors tension.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

13.3.2 Comment choisir son localisateur de câble *(figure 13.27)* ?

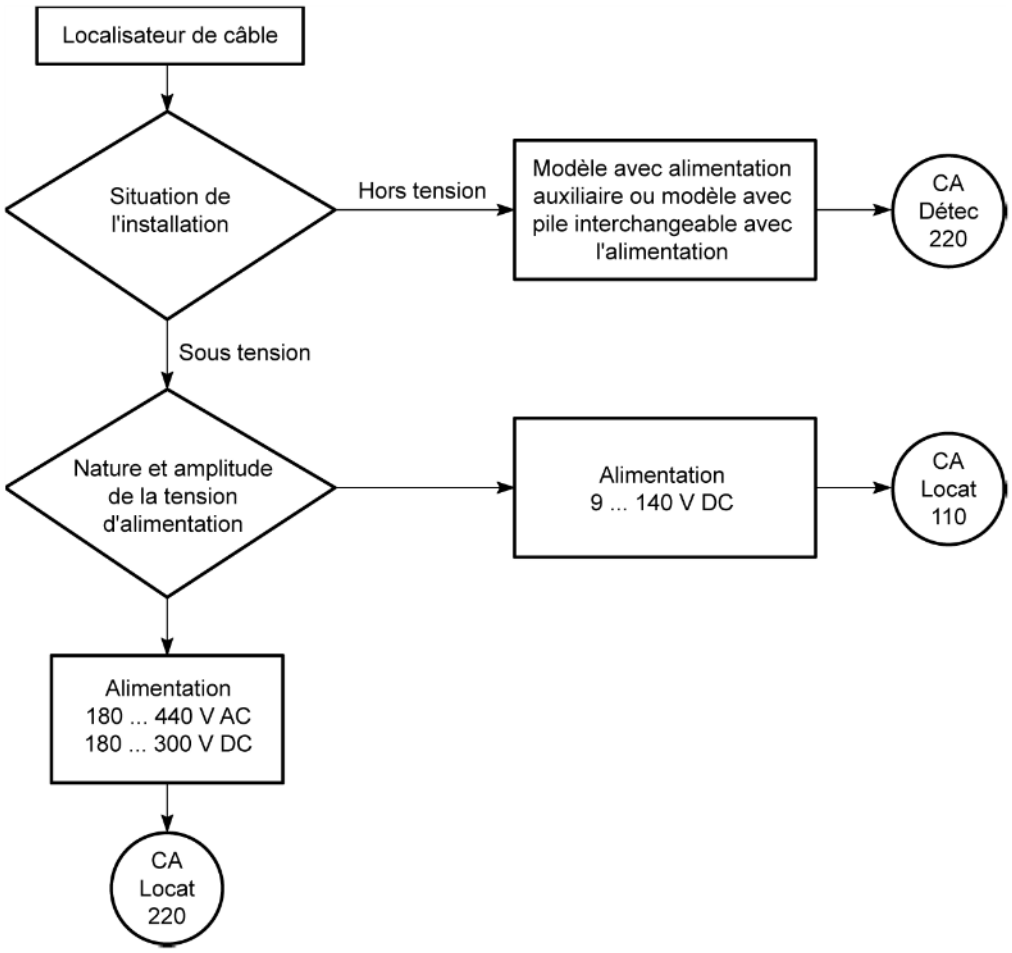


Figure 13.27 – Choix d'un localisateur de câble.

Remarque : ce qui différentie les modèles est essentiellement le type d'émetteur que l'on choisira en fonction du type d'installation où l'on effectuera cette localisation de conducteur.

Le récepteur sera toujours alimenté par pile 9 V et fourni avec l'émetteur.

13.3.3 Fiche technique

Caractéristiques électriques :

Locat 110 et 220 (installation sous tension)

Émetteur Locat E110
Alimentation : 9… 140 AC
Consommation moyenne : 5 mA
Consommation crête : 250 mA pendant 10 ms
Fréquence d'utilisation : 0… 60 Hz
Protection par fusible : 0,1 A HPC
Bornes de sécurité : Ø 4 mm

Récepteur Locat R
Alimentation :
1 pile 9 V alcaline
Consommation typique :
20 mA

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Émetteur Locat E 220
Alimentation 180… 300 DC
180… 440 V AC
Autres, voir E110.

DETEC 220 (installation hors tension)

Émetteur Locat E220
Alimentation : 7… 250 V AC
Consommation moyenne : 16 mA
Consommation crête : 50 mA pendant 10 ms
Fréquence d'utilisation : 0… 600 Hz
Protection par fusible : 0,315 A HPC
Bornes de sécurité : Ø 4 mm

Récepteur DETEC R
Idem Locat R

13.3.4 Normes

Conforme aux normes européennes au niveau CEM ainsi qu'aux normes NF EN 081-1 et NF EN 55082-1.
Émission : classe B (selon NF EN 55014 et NF EN 55022).
Immunité :
- Décharges électrostatiques (selon CEI 801-2) niveau 3 (8 kV – aptitude B).
- Champs électriques (selon CEI 801-3) niveau 2 (3 V/m – aptitude A).
- Transitoires électriques rapides (selon CEI 804-4) niveau 2 (1 kV – aptitude B).

Sécurité électrique :
- Double isolation : classe II (selon CEI 61010).
- Tenue diélectrique : 4 kV (selon CEI 61010).
- Chocs électriques : tenue 5 kV, 2 J (selon CEI 801-5).

Caractéristiques des boîtiers :
- Polycarbonate incassable.
- Résistance aux chutes : 1 m (selon CEI 68-02-32).
- Autoextinguibilité : V0 (selon UL 94).
- Degré d'étanchéité (selon CEI 529) : IP 10 pour les récepteurs ; IP 40 pour les émetteurs.

Conditions climatiques : température de 0 °C à + 50 °C, humidité relative jusqu'à 70 % HR.

13.4 Mesure de rotation de phase

13.4.1 Objectif

Repérer l'ordre des phases afin de coupler deux machines triphasées entre elles ou entre une machine et le réseau (alternateur), ou de détecter le sens unique de rotation d'un moteur électrique dans une installation particulière : certains tapis roulants pèse-charge, ventilateur, etc.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

13.4.2 Principe

On relie les bornes B1, B2, B3 aux bornes secteur 1, 2, 3.

Deux cas sont possibles à la fermeture de KR, si $R = 1/CW$ alors la valeur de J_{12} est affichée par l'ampèremètre :

– À la fermeture de KC, KR étant fermé, l'ampèremètre voit $I_1 = 2\,J_{12}$ et les bornes correspondent, B2 = phase 2, B3 = phase 3. Voir schéma de branchement *figure 13.28*.

– À la fermeture de KC, KR étant fermé, la valeur affichée est divisée par deux, $I_1 = J_{12}/2$ et les bornes de phase sont B2 = phase 3 et B3 = phase 2. Voir schéma de branchement *figure 13.29*, inversion de deux phases.

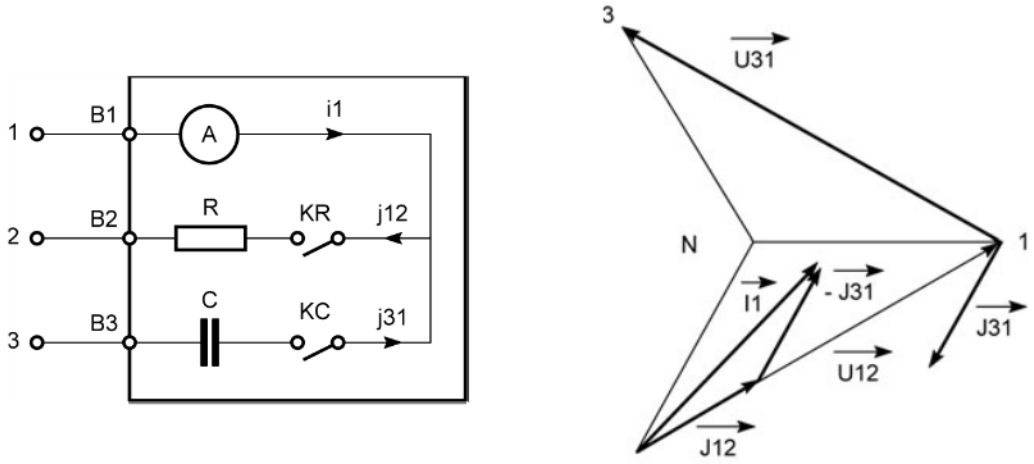


Figure 13.28 – Détecteur d'ordre des phases.

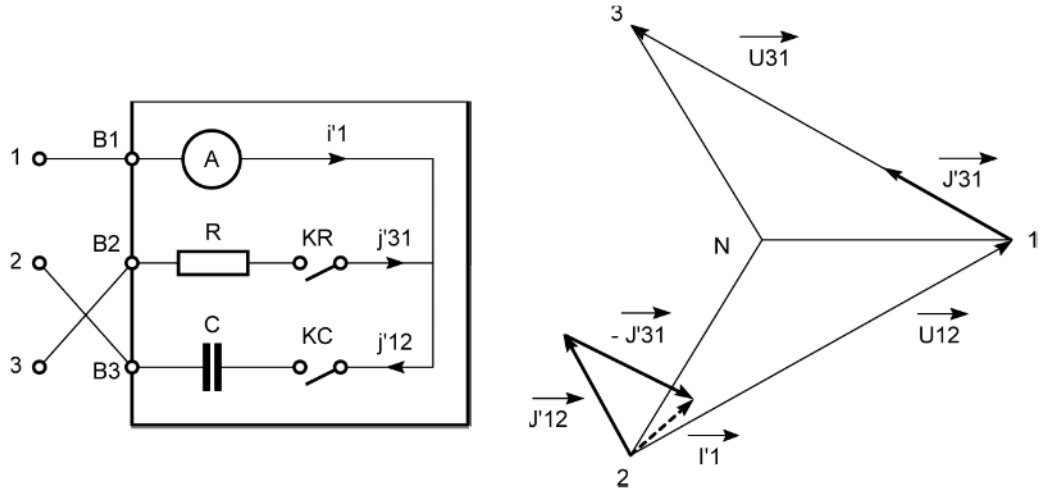


Figure 13.29 – Détecteur d'ordre des phases après inversion de deux phases.

13.4.3 Autres possibilités, détecteur à lampe ou à Led

1) L'ampèremètre peut être remplacé par une lampe témoin qui brillera moyennement à la fermeture de KR et selon les cas :

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– brille davantage à la fermeture de KC (B2 = phase 2, B3 = phase 3) ;
– s'éteint à la fermeture de KC (B2 = phase 3, B3 = phase 2).

Dans les détecteurs du commerce, un bouton poussoir remplace l'interrupteur, KC, et KR est une liaison fixe. Dans d'autres dispositifs, trois fils sortent du boîtier, on en branche deux, et le troisième nous indique par l'éclairement de la lampe que l'ordre est bon 1-2-3, si elle reste éteinte alors l'ordre est 1-3-2.

2) L'ampèremètre peut être remplacé par une lampe à fonctionnement inversé.
Il suffit de croiser à l'intérieur du boîtier, R = B3 et C = B2, pour obtenir une lampe éteinte quand l'ordre des phases est bon.
Appareillage : cette fonction est la plupart du temps une sous-fonction des appareils devenant de plus en plus polyvalents (*figure 13.30*).

Figure 13.30 – C.A 701 DDT et indication d'ordre et phase.

13.5 Mesure de signaux bas niveaux

13.5.1 Objectif

Tester des boucles de process de 4-20 mA ou 0-10 V, des signaux de commande, des capteurs intelligents. Il s'agit d'étalonnage appelé aussi calibration (même si le calibrage désigne uniquement des grandeurs mécaniques).

13.5.2 Application

– Test de boucle de process 4-20 mA dans la réfrigération, climatisation…

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Test de signaux de commande.
– Test de signal délivré par un transmetteur de pression 0-500 bar à sortie 4-20 mA.
– Vérification de la configuration d'un afficheur de tableau censé afficher la valeur directe en bars mesurée par le capteur-transmetteur précédent.
– Mesure de température sur Pt100 et calibration.
– Vérification d'une chaîne de mesure de température (à thermocouple).
– Mesure de courant de polarisation d'étages d'amplificateurs.
– Mesure du courant de décroché de lignes téléphoniques.
– Calcul de la consommation d'appareils en mode veille.
– Estimation de pertes à vide.
– Pistage de courant de fuite.
– Recherche de mauvaise mise à la masse.

13.5.3 Rappels théoriques : quelle est la fonction d'une boucle de process 4-20 mA ?

■ Rappel 1

La boucle 4-20 mA permet d'avoir une image directe en courant (car linéaire) de la valeur de la grandeur physique à mesurer. De plus, le fait, d'avoir une plage variant de 4 à 20 mA (avec décalage d'origine) et non pas de 0 à 20 mA permet lorsque la valeur est à zéro de détecter toute anomalie et de s'affranchir du bruit de fond (*figure 13.31*).

Exemple : vérification du signal délivré par un capteur/transmetteur de pression 0-500 bar à sortie 4-20 mA : avec un C.A 61 Chauvin Arnoux. L'appareil est mis en mode « in », l'affichage de la mesure peut se faire en mode ampèremètre (mA) ou en pourcentage (%) de l'étendue de la mesure :

– 4 mA correspond à 0 % donc 0 bar.
– 12 mA correspond à 50 % donc 250 bar.
– 20 mA correspond à 100 % donc 500 bar.

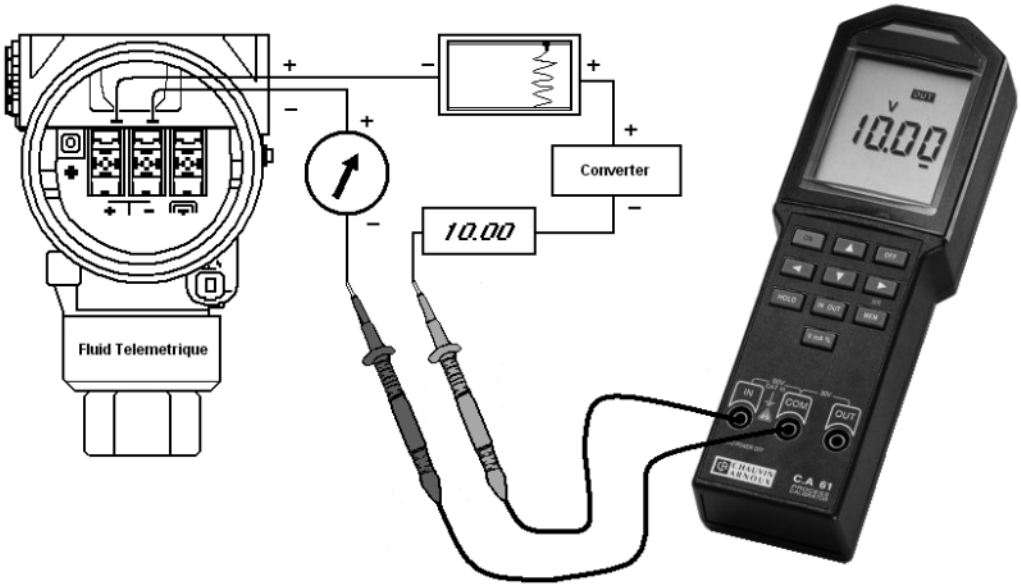


Figure 13.31 – Mise en œuvre d'une boucle 4-20 mA.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Rappel 2

Transmission de données par boucle 4-20 mA. Elle est constituée par deux boucles, l'une pour l'émission, l'autre pour la réception, parcourues ou non par un courant de 20 mA provenant de la source de tension (*figure 13.32*).

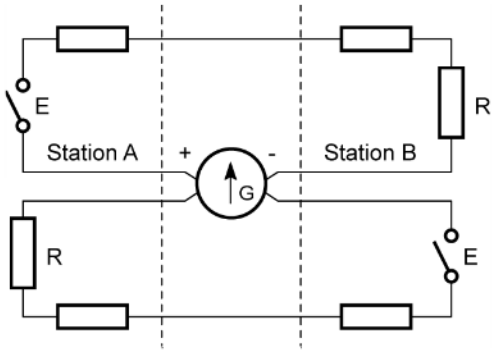


Figure 13.32 – Schéma de la liaison par boucle 4-20 mA.

Les deux stations en liaison peuvent être soit actives soit passives et cela de façon alternative :

– La station est dite *active* lorsqu'elle fournit l'énergie nécessaire au transfert de l'information.
– Elle est dite *passive* dans le cas contraire.

Fonctionnement :
Une absence de courant dans la boucle signifie :

– un bit start ;
– un bit donnée à 0 logique.

Une présence de courant dans la boucle signifie :

– un bit stop ;
– un bit donnée à 1 logique.

Ligne au repos.
La vitesse de transmission dépend de la longueur et de la section du câble utilisé, elle est de l'ordre de : 6 bauds jusqu'à 3 km environ et 9 600 bauds pour quelques centaines de mètres (*figure 13.33*).
Par sa simplicité de mise en œuvre, la liaison par boucle de courant est surtout utilisée lorsque les données à transmettre ne présentent pas un caractère systématique.
C'est le cas en particulier du dialogue homme/machine où le débit n'excède pas quelques milliers de bauds.

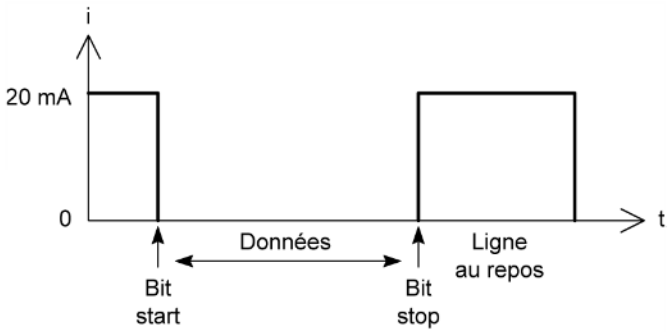


Figure 13.33 – Trame de la liaison par boucle de courant.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

13.5.4 L'étalonnage sur site

Principe : pour étalonner un appareil quelle que soit la grandeur qu'il mesure, il faudra respecter plusieurs règles :

– le calibrateur doit être 4 à 5 fois plus précis que l'appareil qu'il étalonne ;
– certaines grandeurs ne s'étalonnent pas sur le terrain en présence d'influences externes (température, humidité, vibrations…) augmentant considérablement l'incertitude des mesures. Pour l'instant les calibrateurs de terrain ne concernent essentiellement que les signaux électriques (courant, tension, température, pression).

Le calibrateur de terrain a l'avantage d'étalonner sans rien démonter et donc d'éviter toute fausse manipulation (serrage trop important d'un écrou fatal à un capteur) et de gagner du temps.

Un calibrateur réalise deux actions :

– la **simulation** : il délivre un signal précis équivalent à la grandeur à simuler appliqué en amont de la chaîne à étalonner ;
– la **mesure** est réalisée en fin de chaîne pour vérifier le résultat. Soit la chaîne se termine par un indicateur ou un enregistreur, il suffit alors de comparer la valeur lue à la valeur théorique, soit elle se termine par un transmetteur et là, la fonction mesure du calibrateur prend toute son importance.

■ Méthode d'étalonnage

Les métrologues prônent l'étalonnage de tous les éléments les uns après les autres de la chaîne et non pas l'étalonnage globalisé de la chaîne.

Mais il est parfois difficile de séparer les éléments voir impossible, on se contente alors de simuler le signal brut du capteur et de vérifier le signal normalisé fourni par le convertisseur : il s'agit d'un étalonnage électrique du transmetteur.

Ces successions de schémas montrent où ils peuvent intervenir dans la chaîne de mesure. Certains modèles peuvent étalonner la chaîne complète (du capteur à l'indicateur), d'autres se limitent à étalonner la partie électrique uniquement.

La plupart des calibrateurs du marché ne peuvent qu'étalonner le système de conversion du signal et non le capteur seul. Pour étalonner par exemple un thermocouple ou une Pt100 sur site, il faut sortir le capteur du procédé et le plonger dans un four étalon portable qui contient une sonde de référence.

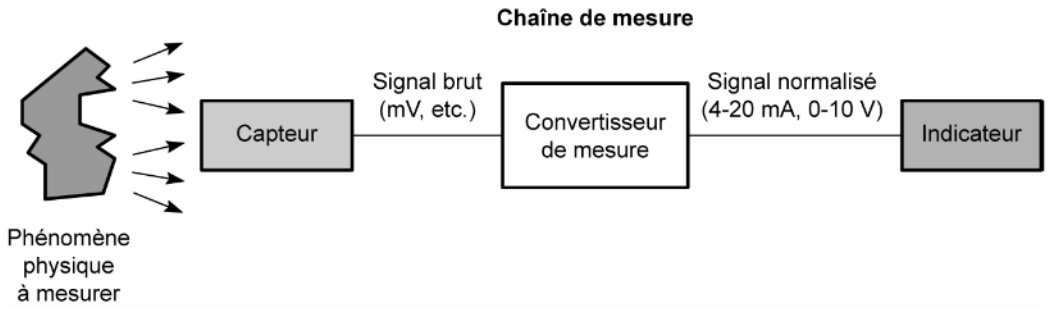


Figure 13.34A – Constitution d'une chaîne de mesure.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

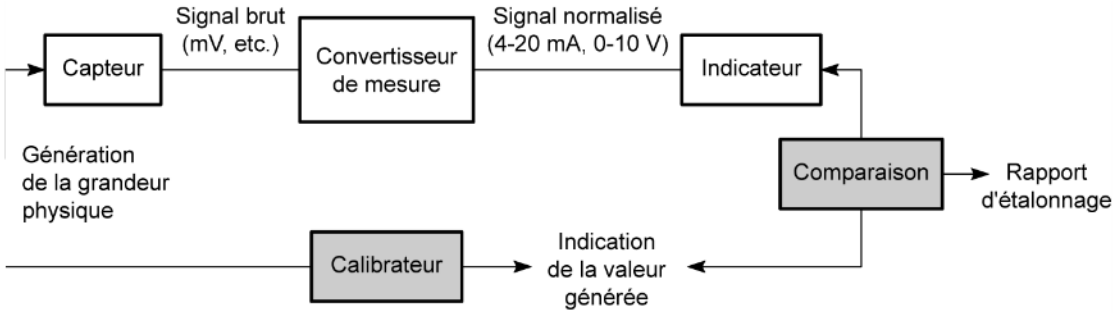


Figure 13.34B – Étalonnage de la chaîne complète.

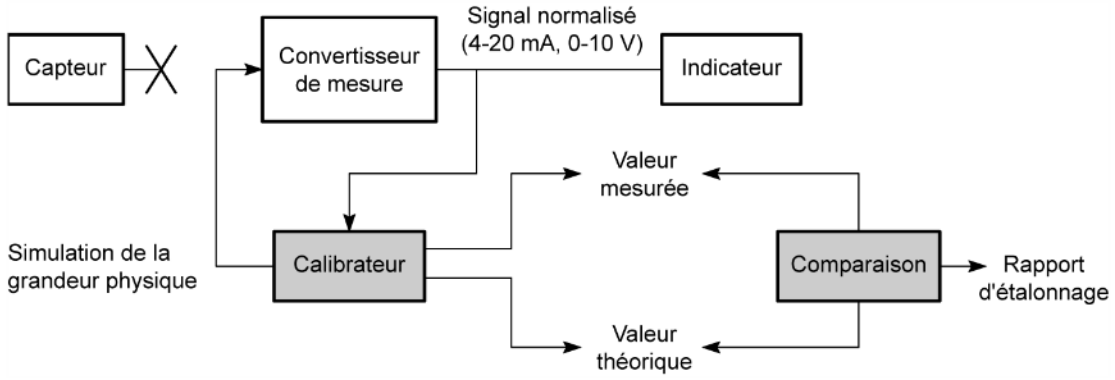


Figure 13.34C – Étalonnage du convertisseur de mesure.

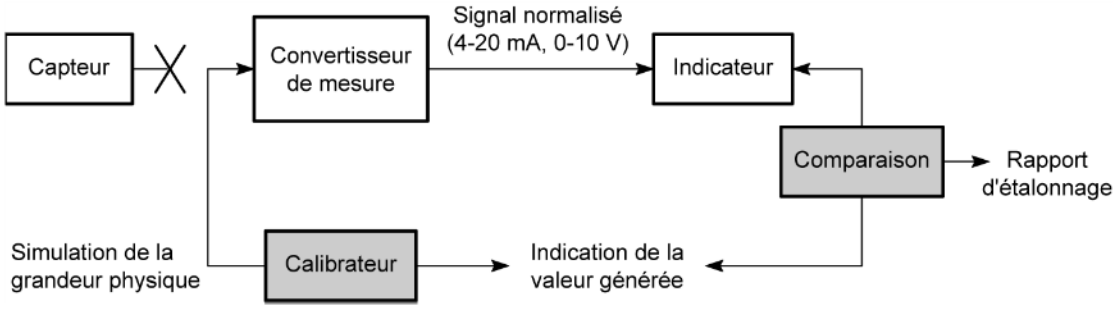


Figure 13.34D – Étalonnage de la partie électronique.

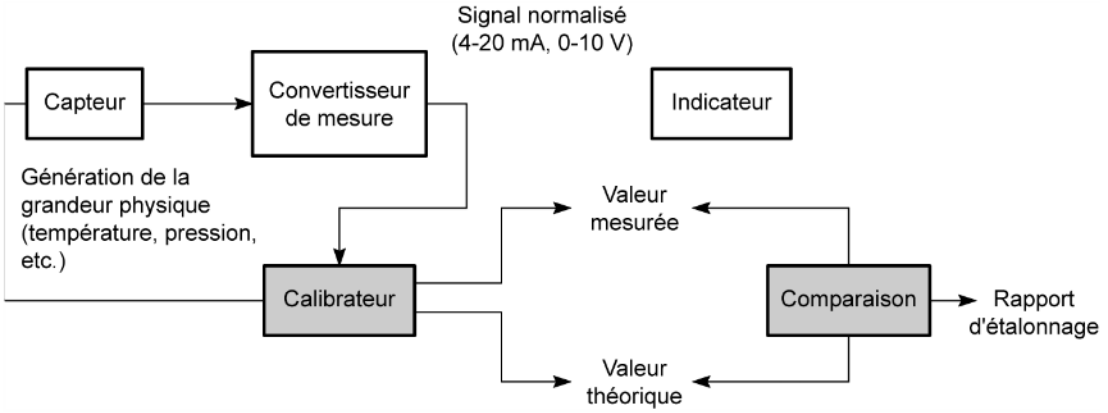


Figure 13.34E – Étalonnage du capteur et du convertisseur.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

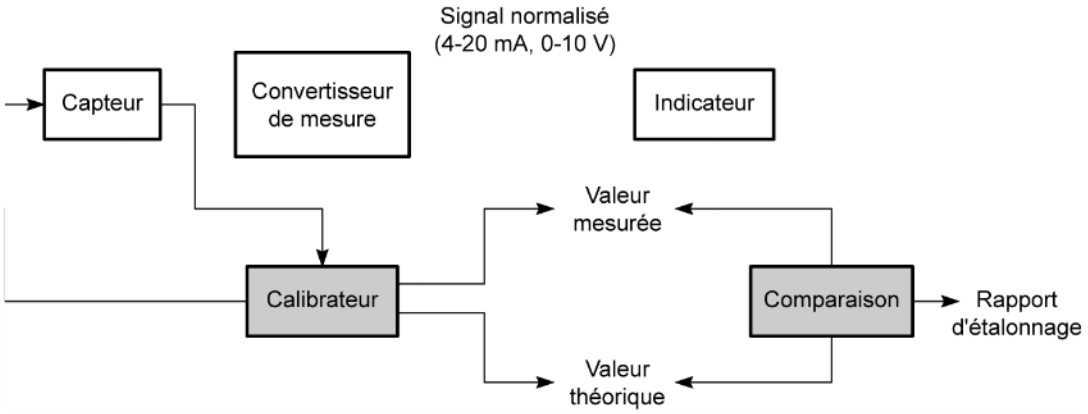


Figure 13.34F – Étalonnage du capteur seulement.

La norme de qualité ISO 9000 a incité les industriels à s'équiper de calibrateurs non seulement parce que leur parc d'instrumentation s'est développé mais aussi parce qu'ils ont pris conscience de l'importance des procédures d'étalonnage.

Les principaux constructeurs : AOIP Instrumentation, Beamax, Besançon instruments, Chauvin Arnoux, Fluke, Kélatron, Wavetek (MB Électronique) proposent des calibrateurs avec mémoire incorporée pour sauvegarder et restituer les résultats d'étalonnage traités par logiciel sur PC via une interface série RS232 ou 485.

En amont les procédures sont définies dans le logiciel pour être exécutées automatiquement par le calibrateur de terrain.

La traçabilité est parfaitement assurée et de plus on réduit le temps d'étalonnage par deux (20 minutes à présent en libérant la personne pendant ce temps).

■ Appareillages

□ Sonde de mesure courant faible : série K de Chauvin Arnoux

Objectif : très compactes, les micropinces de la série K peuvent réaliser des mesures dans des endroits peu accessibles comme la plupart des tableaux électriques, des systèmes boucles de process ou encore les faisceaux électriques automobiles.

Elles s'associent avec tous les multimètres de grande sensibilité pour fournir des signaux AC et DC proportionnels au courant mesuré calibre 1 mV/mA pour la pince K1 et 10 mV/mA pour la pince K2.

La mesure RMS avec la composante AC+DC est possible.

Caractéristiques électriques incomplètes de la pince K1 (voir *figure 8.44*) :

Calibre de courant :

– 1 mA à ± 4,5 A en DC
– 1 mA à 3 A RMS
– 1 mA à 2 A crête, carré et échelons

Sortie : 1 mV/mA.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Caractéristiques électriques incomplètes de la pince K2 :
Calibre de courant :

– 0,1 mA à ± 450 mA en DC
– 0,1 mA à 300 mA RMS
– 0,1 mA à 450 mA crête, carré et échelons

Sortie : 10 mV/mA

Résolution : DC 50 µA typique, AC 100 µA typique

Précision : de 1 à 2 % du courant primaire suivant la plage du courant primaire et la nature AC ou DC.

Utilisation : elle permet de mesurer comme toute autre pince ampèremétrique des courants sans ouvrir le circuit. Enserrant le conducteur, l'utilisateur se trouve automatiquement isolé de l'installation et la valeur de la mesure n'est pas perturbée par un shunt ou tout autre élément monté en direct.

Points forts : son calibre de sortie est adapté à la lecture directe sur le multimètre.

□ Multimètre calibrateur adapté à la mesure et à la génération de courants faibles

Objectif : tester et étalonner tous les circuits grâce à des fonctions de mesures et de génération.
Fonctions de mesures : tensions, faibles courants (mA), éléments thermorésistifs, thermocouples, fréquence, résistances pour le test des capteurs et des transmetteurs.
Fonctions génération : génère et simule les tensions, les faibles courants (mA), les thermocouples, la fréquence, les résistances et la pression pour l'étalonnage des transmetteurs.

■ Applications possibles

– Test de boucle de process 4-20 mA.
– Génère les mA avec mesure simultanée de la pression pour le pilotage des tests de soupape et de courant/pression.
– Supporte le test des débitmètres grâce aux fonctions de fréquence et CPM (points/minutes).
– Réalise les tests rapides de linéarité grâce aux fonctions de pas et de rampe automatiques.
– Alimente les transmetteurs pendant la durée du test à l'aide de la boucle d'alimentation et mesure simultanément les mA.

Il existe des calibrateurs multiproduits (11 calibrateurs en 1) notamment chez Fluke (*figures 13.35 et 13.36*) : multimètres portables, oscilloscopes, wattmètres, thermomètres électroniques, centrales d'acquisition, enregistreurs, tables XY, analyseurs d'harmoniques, calibrateurs de process, pinces de courant.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Figure 13.35 – Multimètre calibrateur modèle 726 de Fluke.

Figure 13.36 – Calibrateur 5320A de Fluke.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 13.6 – Caractéristiques du multimètre calibrateur 705.

Fonction	705	715	787	
Volt				
Gamme	0-28 V DC	0-100 mV 0-10 V	0-1000 V AC ou DC	
Résolution	1 µV	10 µV 1 mV	0,1 mV à 1.0 V	
Tolérance	0,025% lect. + 1 digit	0,02% lect. + 2 digit	0,1% lect. + 1 digit (VDC)	
Courant				
Gamme	0-24 mA	0-24 mA	0-1 A	0-30 mA
Résolution	0-001 mA	0,001 mA	1 mA	0.001 mA
Tolérance	0,02% + 2 digit	0,015%	0,2%+2 digit	0,05%+2 digit
Source courant				
Gamme	0-20 mA ou 4-20 mA[1]	0-20 mA ou 4-20 mA [1]	0-20 mA ou 4-20 mA [1]	
Tolérance	0,025% lect. + 2 digit	0,015% + 2 digit	0,05% d'échelle	
Aptitude de source	1 000 Ω à 24 mA	1 000 Ω à 24 mA	500 Ω à 24 mA	
Alimentation de boucle	24 V	24 V	N/A	
Source de courant	N/A	0-100 mV ou 0-10 V	N/A	
Résistance	N/A	N/A	à 40 M Ω, 0,2% + 1 digit	
Fréquence	N/A	N/A	à 19,999 kHz, 0,005% + 1 digit	
Test diode	N/A	N/A	2,4 V chute de tension d'une diode	
Continuité	N/A	N/A	Beeps pour résistance <100 ohms	
Affichage en courant et en %	Oui	mA ou %	Oui	
Pas et échelle automatiques	Oui	Non	Oui	
Contrôle d'échelle	Oui	Non	Non	
Durée de vie de la pile	18 heures typiques à 12 mA	18 heures typiques à 12 mA	50 heures typiques 12 heures typiques en source 12 mA	

[1] pouvant aller jusqu'à 24 mA

Tableau 13.7 – Principales caractéristiques du calibrateur 5500A de Fluke.

Tension continue : 330 mV à 1000 V
Courant continu : 3,3 mA à 11 A
Tension alternative : 33 mV à 1000 V (45 Hz à 1 kHz)
Courant alternatif : 330 µA à 11 A (45 Hz à 1 kHz)
Résistance : 11 Ω à 330 MΩ
Capacité : 330 pF à 1,1 mF
Puissance : 11 kW (DC à 10 kHz)
Fréquence : 200 kHz à 2 MHz
Température (thermocouple) : B, C, E, J, K, L, N, R, S, T, U
Température (résistance) : Pt 385 (100 Ω, 200 Ω, 1 000 Ω), PtNi 385 (120 Ω), Pt 3926 (100 Ω), Pt 385 (500 Ω), Pt 3916 (100 Ω), Cu427 (10 Ω)

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ Utilisation des appareils

Branchement soit par pince ampèremétrique en enserrant le câble soit comme un simple ampèremètre et mesure de la valeur du courant.

□ Exemple n° 1 : vérification d'un afficheur

Principe : on branche le calibrateur en générateur « out », le générateur délivre 4 mA (valeur à entrer par le clavier du C.A 61) et on vérifie si l'afficheur indique 0000, de même pour 12 mA, l'afficheur doit indiquer 0250, et pour 20 mA, il doit afficher 0500.

□ Exemple n° 2 : mesure de température sur Pt100 et calibration

Principe : une Pt100 est une résistance qui fait 100 Ω à 0 °C.
Pour mesurer la température, il faut donc une sorte d'ohmmètre qui génère un courant (faible pour ne pas échauffer la sonde) et qui lit la chute de tension aux bornes de la sonde.
Cette tension est ensuite linéarisée et convertie en température.
Utilisé en calibrateur, l'appareil simule une résistance, c'est-à-dire que, vis-à-vis d'une excitation extérieure, les deux bornes « out » se comportent comme une résistance dont la valeur ohmique correspond à une température donnée (il faut toutefois respecter le sens de branchement).

□ Exemple n° 3

Principe : un thermocouple est un générateur de tension. Pour mesurer la température à partir d'un thermocouple, il suffit d'un millivoltmètre. La tension lue est ensuite linéarisée suivant le type de thermocouple et convertie en température.
En calibrateur, l'appareil délivre une tension (quelques millivolts), dont la valeur est le reflet de la température pour un type de couple donné.
Bien penser à faire correspondre le type de thermocouple avec le capteur utilisé ou l'entrée de la chaîne de mesure (l'appareil ne vous indiquera pas que la valeur est fausse le cas échéant).

Fiche technique :

Spécifications :
1) Mesures :
Mesure effectuée : pression (pression maximale mesurée), température (type de thermocouple ou type de sonde Platine), mesure de boucle de courant (4-20 mA et 0-20 mA).
La plage de mesure réalisable (– 200 à + 1 800 °C…).
La résolution 0,1 mbar/précision : ± 0,05 % PE et 0,1 °C…
La précision : 0,3 °C + 10 µV…

2) Simulation :
Source de tension : plage, résolution, précision.
Source de courant : idem.
Simulation de température : gamme, résolution.

3) Autres :

– Fonctions annexes des calibrateurs de process : sortie rampe de tension et de courant, mode cycle ou continu, génération de signaux programmé par l'utilisateur, signal de sortie carré réglable en rapport cyclique, fréquence, et amplitude, etc.
– Alimentation pile 9 V.
– Liaison série RS232 avec logiciel d'acquisition de données sous Windows™ avec câble de liaison opto-isolé.
– Dimensions ergonomiques.

Normes : certains sont utilisables en ambiance dangereuse (sécurité intrinsèque) et sont certifiés CENELEC EEx ia II C T6 alimenté par batterie interne.

13.5.5 Testeurs de composants

■ Test de diode et de Led

Objectif : relever la valeur de la tension de seuil entre anode et cathode. Tous les multimètres nouvelle génération offrent la possibilité de tester les diodes et les Led (voir appareil Peak, *figure 13.37*).
Une diode est un commutateur électronique (semi-conducteur) ne laissant passer le courant qu'à partir d'une certaine tension en général 0,6 V pour une diode au silicium (0,3 V pour le germanium) et uniquement dans un seul sens.
Certains multimètres comportent un mode de mesure spécial appelé « test de diode ». Dans ce mode, les mesures affichées pour des diodes en bon état doivent se situer dans un sens entre 0,6 et 0,7 V (pour le silicium) et indiquer un circuit ouvert dans l'autre sens.
Si les deux mesures affichées indiquent un circuit ouvert, la diode est coupée. Si au contraire les deux mesures indiquent une continuité, la diode est en court-circuit. Dans les deux cas elle est détruite.

■ Test de semi-conducteurs, résistances, condensateurs, selfs

Certains appareils plus complexes permettent d'évaluer le bon fonctionnement des composants électroniques les plus récents MOS et CMOS sans alimentation électrique (pratique en cas de panne totale d'une carte), en intégrant un générateur d'impulsions permettant de tester en mode actif les composants à semi-conducteurs déclenchés par gâchette, thyristors, triacs, optocoupleur… Leurs applications vont de la maintenance de carte électronique, au test préalable de composant avant la fabrication de nouvelles cartes.
Ils permettent aussi de localiser rapidement les pannes en comparant les mesures avec celles effectuées sur le même circuit en bon état.
Ils donnent la **signature analogique du composant**.
Le TR210 de Tektronix fonctionne par application d'un signal AC limité par le courant sur deux points du composant à tester. Le débit de courant entraîne une déflexion verticale de l'affichage de l'oscilloscope et la tension une déflexion horizontale. L'association des deux, forme une signature analogique de courant-tension qui représente l'état général de l'appareil testé.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

En analysant chaque signature, on peut rapidement déterminer si le composant est bon ou détérioré.

Testeur universel

Objectif : identifier et tester les transistors bipolaires, Mosfet, en affichant sur deux lignes les caractéristiques suivantes : brochage, gain, tension de jonction, type : NPN/PNP, canal N, canal P, etc.

L'emploi d'un tel testeur est simple : connecter et appuyer sur un seul bouton (*figure 13.37*).

Figure 13.37 – Testeur universel de composants électroniques de Peak.

Mesure de capacité de condensateurs

Objectif : mesurer la valeur de la capacité des condensateurs de différentes technologies.

Testeur de transistor bipolaire

Ces appareils indiquent le brochage par Led : collecteur, base, émetteur, son type NPN ou PNP et son bon état. Il convient aussi bien pour les transistors germanium ou silicium.

Géré par microprocesseur, il garantit des tests sous faibles signaux pour éviter toute détérioration du composant.

Certains multimètres numériques intègrent aussi les mêmes contrôles avec en plus la mesure du gain.

Testeur de transistor MOSFET

Ces appareils indiquent le brochage par Led : grille, drain, source, et le bon état de tous les transistors MOSFET à enrichissement.

Test de circuit ouvert, court-circuit et faible gain.

Géré par microprocesseur, il garantit des tests sous faibles signaux pour éviter toute détérioration du composant.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

■ **Testeur type pont RLC**

Principe de la mesure d'un condensateur :

– Méthode voltampèremétrique.
– Méthode de l'ampèremètre.
– Méthode des trois voltmètres.
– Méthode du pont de Sauty.

Figure 13.38 – Testeur de pont RLC de table (Française d'instrumentation).

Figure 13.39 – Testeur de pont RLC portatif (ELC).

13.6 Contrôleur multifonction de machines et d'appareillages électriques

13.6.1 Introduction

Obligatoire depuis 1995, cette directive, qui vise à garantir la sécurité des utilisateurs, impose quatre types d'essais électriques :

– essai du temps de décharge ;
– essai d'isolement ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus au termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– essai de continuité ;
– essai diélectrique.

Ces appareils servent à contrôler et certifier la sécurité électrique des machines, d'appareillages et d'équipements, selon la norme européenne EN 60204-1 (*figure 13.40* et *tableau 13.8*).

Figure 13.40 – Contrôleur de machines C.A 6121.

Tableau 13.8 – Rappels de la norme directive machine EN 60204-1.

Temps de décharge
1 s maxi à 60 V sur l'alimentation (mesure 2 points) et 5 s maxi sur toute autre partie accessible (mesure 4 points)
Isolement
1 MΩ sous 500 V DC
Continuité
ΔU maxi sous I > 10 A AC pendant 10 s (fonction de la section du câble PE) 1,0 V maxi / ≥ 6,0 mm^2 1,4 V maxi / 4,0 mm^2 1,9 V maxi /2,5 mm^2 2,6 V maxi /1,5 mm^2 3,3 V maxi /1,0 mm^2
Diélectrique
2 × U nominal (mini 1 kV) sous 500 VA pendant 1 s

Pour faciliter la mise en conformité des machines neuves ou installées, certains constructeurs ont regroupé l'ensemble des mesures nécessaires, en un unique appareil « tout terrain ».

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Outre leurs capacités de mesures et la variété de leurs accessoires, ces appareils disposent aussi d'une confortable mémoire et d'une sortie RS232 pour impression papier ou pour exploitation sur PC.

Les mesures doivent être conformes à :

- CEI 60204-1 – Équipement électrique de machines.
- CEI 60335-1 – Appareils électriques domestiques et analogues.
- CEI 60439-1 – Appareils de commutation et de commande.
- CEI 60598-1 – Luminaires.
- CEI 60745 – Outillages portables à moteur.
- CEI 60755 – Dispositifs de protection à courant résiduel.
- CEI 60950 – Sécurité d'installation de technologie d'information.
- CEI 61010-1 – Exigences sécurité pour l'installation électrique.
- CEI 61029 – Outils à moteur transportables.
- CEI 61558-1 – Transformateurs et appareils d'alimentation.
- EN 60065 – Appareils électroniques audio, vidéo et analogues.
- VDE 701 T1 – Contrôles de réparation et de modification.
- VDE 702 T1 – Tests répétés d'installations électriques.

13.6.2 Les différents essais à réaliser et caractéristiques communes aux appareils multifonctions

Tableau 13.9 – Caractéristiques du contrôleur machine C.A 6121.

Caractéristiques

DIÉLECTRIQUE

Tension nominale de test (50 Hz) *	1000 V	1250 V	1500 V
Courant de déclenchement	1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 mA	1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 mA	1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 333 mA

** Tension de test supérieure à 1000, 1250 ou 1500 V / 50 Hz à une tension $U_{secteur}$ = 230 V et une puissance P_{charge} = 500 VA*

Affichage	Tension de test	Courant de test (sinusoïdal)	
Gamme	0...2,00 kV	0...199,9 mA	200...500 mA
Résolution	10 V	0,1 mA	1 mA
Précision	±(2% L + 20 V)	±(2% L + 0,3 mA) *	

** ±(2% L + 0,5 mA) si courant de déclenchement réglé sur 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ou 100 mA et ±(2% L + 2 mA) sur 150, 200, 250, 300, 330, 350, 400, 450 ou 500 mA*

- Affichage du caractère du courant de test : résistif, capacitif ou valeur absolue
- Minuterie : sans ou réglable de 1 s à 5 min

RÉSISTANCE D'ISOLEMENT

Affichage	Résistance d'isolement				Tension de test
Gamme *	0...1,999 MΩ	2,00...19,99 MΩ	20,0...199,9 MΩ	200...500 MΩ	0...1200 V
Résolution	1 kΩ	10 kΩ	100 kΩ	1 MΩ	1 V
Précision	±(2% L + 2 pt)			±10% L	±(2% L + 2 pt)

** gammes automatiques*

- Tension nominale : 500 ou 1000 V ⎓
- Courant de mesure : 1 mA mini
- Mesure avec ou sans valeur de seuil réglable (0,2...500 MΩ)
- Minuterie : sans ou réglable de 2 s à 10 min

CONTINUITÉ

Affichage	Chute de tension (ΔU)	Résistance (R_{10A}) *		Tension de test	Courant de test	
Gamme	0...10 V	0...999 mΩ	1,00...1,99 Ω	0...12 V	0...9,99 A	10,0...25,0 A
Résolution	0,01 V	1 mΩ	10 mΩ	0,01 V	0,01 A	0,1 A
Précision	±(2% L + 0,02 V)	±(2% L + 2 mΩ)	± 5% L	±(2% L + 0,02 V)	±(5% L + 2 pt)	±3% L

** gammes automatiques*

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus par l'article L.122-5 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 13.9 – Caractéristiques du contrôleur machine C.A 6121. *(Suite)*

■ Chutes de tension (ΔU) maxi pré-réglées, en fonction de la section du câble :

Section du câble testé	0,5 mm²	0,75 mm²	1 mm²	1,5 mm²	2,5 mm²	4 mm²	6 mm²
Chute de tension maxi	5 V	5 V	3,3 V	2,6 V	1,9 V	1,4 V	1,0 V

■ Mesure de faible résistance (R_{10A}) avec ou sans valeur de seuil réglable (10...2000 mΩ) ■ Tension de sortie maxi : 12 V~ ■ Minuterie : sans ou réglable de 1 à 15 s ■ Courant de mesure (0...0,5 Ω) : > 10 A ~ ■ Système de connexion : 4 fils

TEMPS DE DÉCHARGE

Affichage	Temps de décharge
Gamme	0...10 s
Résolution	0,1 s
Précision	±(2% L + 0,2 s)

■ Niveau de tension de sécurité : 60 V
■ Seuil automatique de temps de décharge :
1 s au niveau des bornes d'alimentation (mesure 2 points)
5 s au niveau des composants internes (mesure 4 points)
■ Tension de service maxi : 600 V AC/DC

13.6.3 Mise en œuvre des essais et normes à respecter (*figure 13.41*)

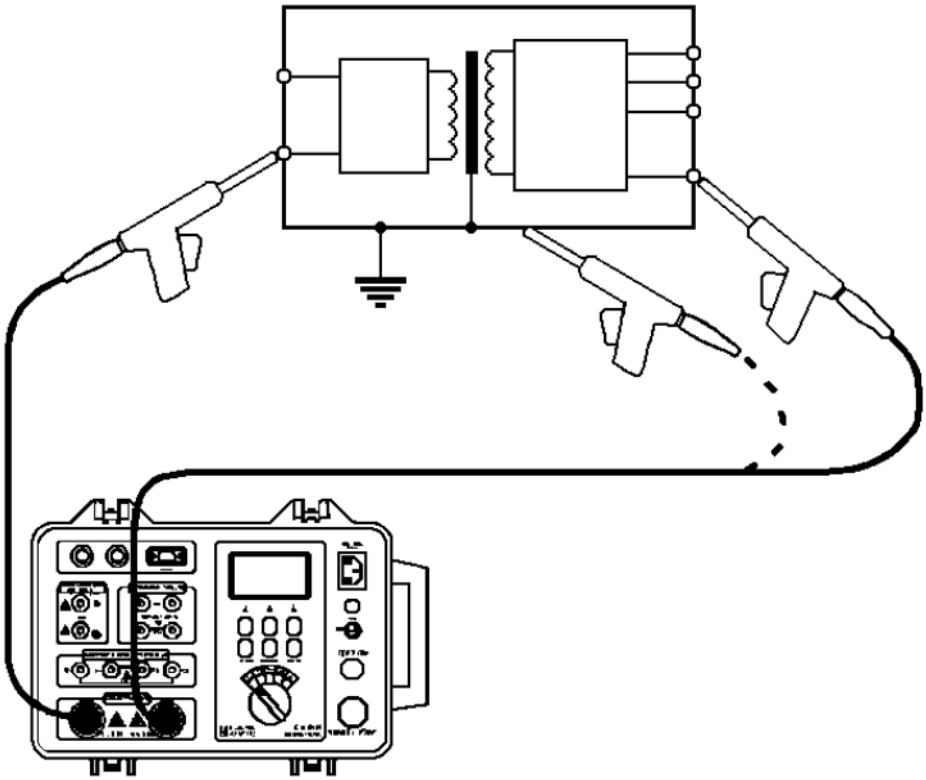


Figure 13.41A – Test diélectrique.

Un logiciel permet de sortir un rapport complet de la machine testée, d'automatiser une séquence d'autotest ou de télécharger pour archivage les données mémorisées dans l'appareil.

Remarque : il est possible pour l'ensemble des mesures :

– de régler un seuil d'alarme et de la déclencher en cas de dépassement ;
– d'établir une séquence de test (*figure 13.42*) avec une mémorisation des différents seuils de la norme souhaitée afin de gagner du temps et d'indiquer automatiquement à l'opérateur de préparer l'appareillage pour le test suivant.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

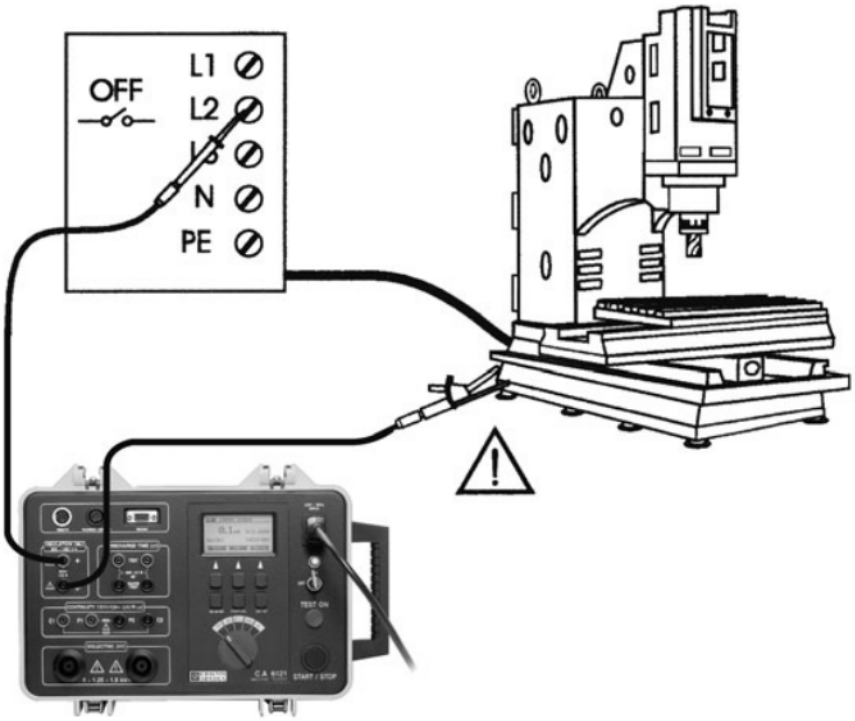


Figure 13.41B – Essai d'isolement avec ou sans minuterie.

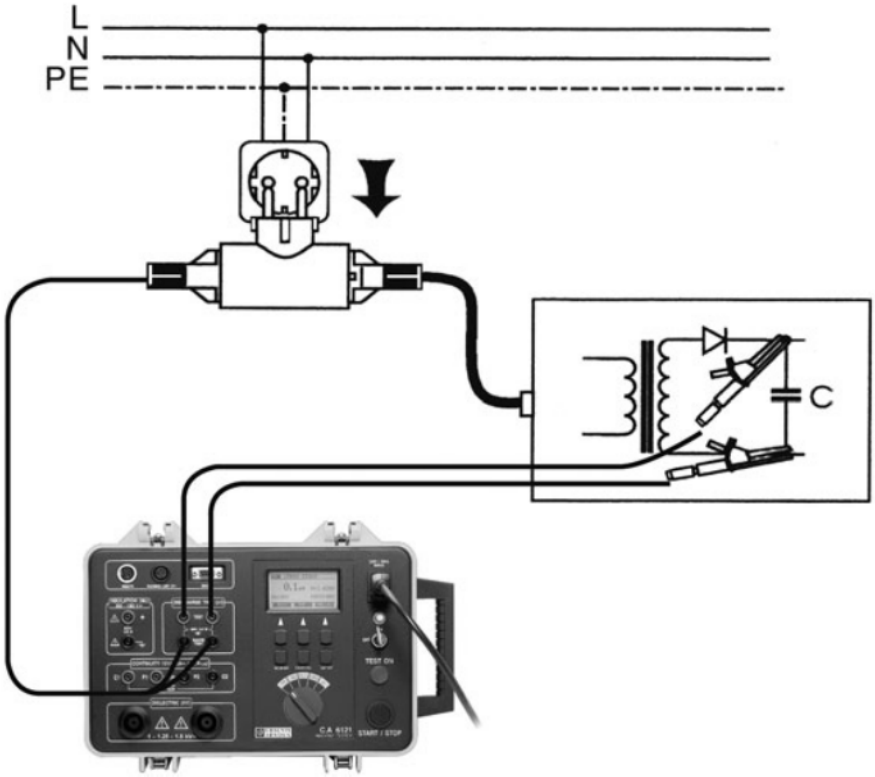


Figure 13.41C – Mesure du temps de décharge.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

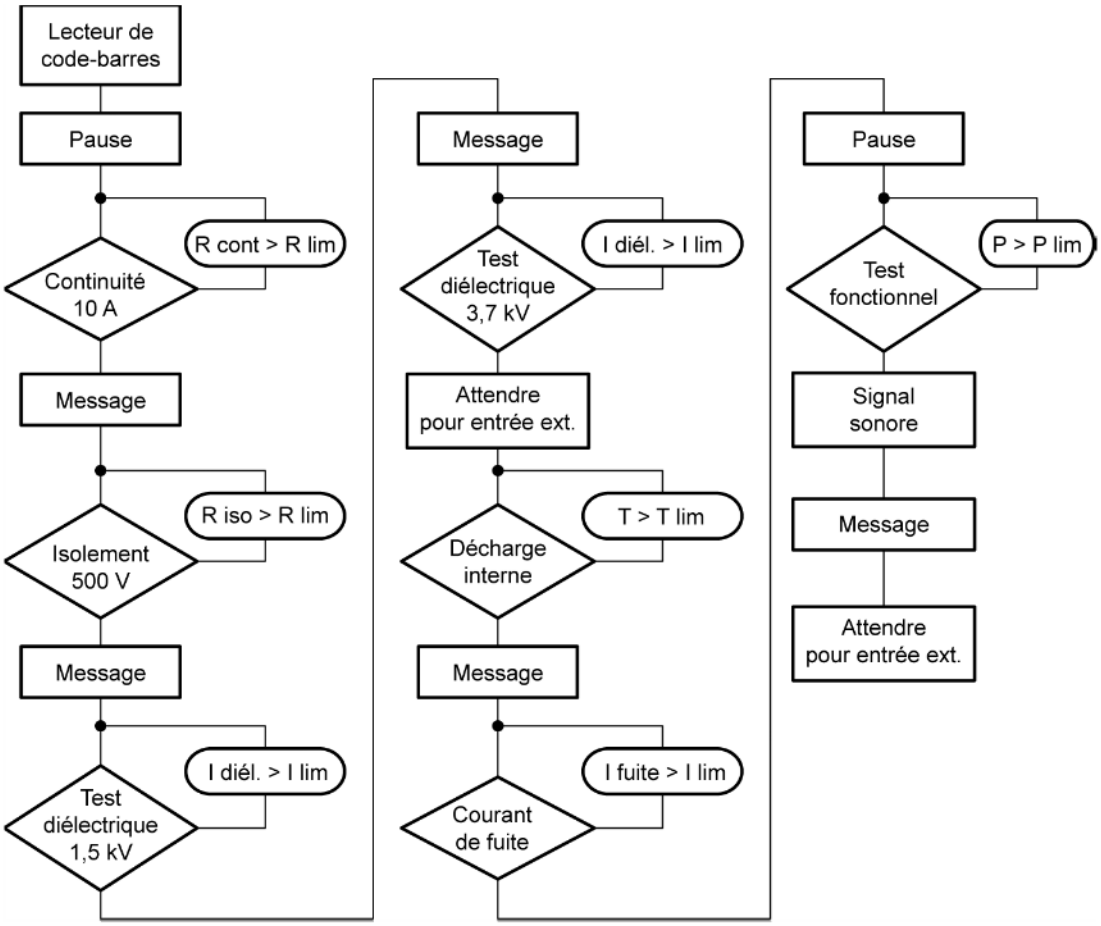


Figure 13.42 – Séquence de test.

Figure 13.43 – Exemple d'accessoires livrés avec le C.A 6121.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Les *figures 13.43 et 13.44* proposent des exemples d'appareils multifonction de Chauvin Arnoux : le C.A 6121 et le C.A 6160. La différence entre les deux appareils se situe au niveau de l'étendue des fonctions et notamment dans le cas du nouveau 6160.

Figure 13.44 – Exemple d'appareil multifonction : le C.A 6160.

13.7 Contrôleur multifonction d'installations électriques

13.7.1 Introduction

Ces appareils servent à contrôler et certifier la sécurité électrique des installations recevant du public suivant la norme NFC 15-100.

La norme impose les différentes mesures suivantes :

- mesure du temps de déclenchement des différentiels ;
- mesure d'isolement ;
- mesure de résistance de terre ;
- mesure de boucle ;
- mesure de continuité du PE ;
- vérification de rotation des phases.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'art. L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Pour vérifier la mise en conformité des installations électriques, certains constructeurs ont regroupé l'ensemble des mesures nécessaires en un unique appareil « tout terrain » (*figure 13.45*).

Outre leurs capacités de mesures et la variété de leurs accessoires, ces appareils disposent aussi d'une confortable mémoire et d'une sortie RS232 pour impression papier ou pour exploitation sur PC.

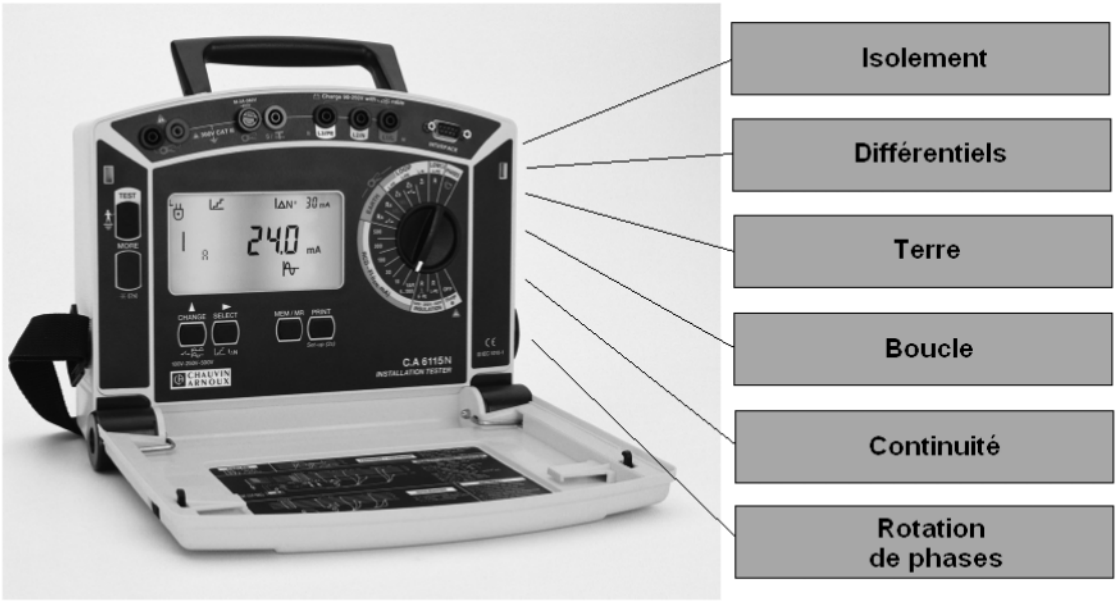


Figure 13.45 – Appareil multifonction C.A 6114 de Chauvin Arnoux.

13.7.2 Rappels des normes sur la sécurité électrique des installations

Normes européennes NFC 15-100, VDE 0100, NIN/NIV, IEE 16th, ÖVE EN-1…

13.7.3 Applications possibles

Dans le domestique, le tertiaire ou l'industrie, ces appareils multifonctions permettent aux électriciens de vérifier leurs travaux neufs ou de rénovations et aux organismes de contrôle de certifier complètement la sécurité des infrastructures qu'elles sont chargées d'inspecter.

Ils permettent de réaliser facilement et sans risques d'erreurs les mesures préconisées par les normes européennes sur les installations électriques.

Ces appareils sont en plus conformes à la toute nouvelle réglementation internationale CEI/EN 61557 qui exige des caractéristiques et un niveau de performance élevé pour les appareils de test d'installation.

13.7.4 Pourquoi réaliser ces différentes mesures ?

■ Pourquoi mesurer l'isolement ?

Normes CEI/EN 61557-2 :

– pour vérifier qu'aucun conducteur n'a subi de dommage mécanique ;
– pour s'assurer que tous les conducteurs actifs sont isolés de la terre.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Tableau 13.10 – Valeurs en Ω à trouver sous les différentes tensions utilisées.

Tension de l'installation	Choix du calibre	Isolement à trouver
< 50 V	250 V	≥ 250 kΩ
De 50 à 500 V	500 V	≥ 500 kΩ
> 500 V	1 000 V	≥ 1 MΩ

■ **Pourquoi mesurer le temps de déclenchement des disjoncteurs différentiels ?**

Normes CEI/EN 61557-6 :

– pour vérifier son déclenchement à $I_{test} = I.N$;
– en maintenance préventive, dans un temps < 300 ms, pour un courant compris entre $I.N/2$ et $I.N$.

Remarque

Ces appareils ne doivent pas faire déclencher les disjoncteurs supérieurs en sensibilité à 30 mA lors des essais pour assurer une continuité de service lors de l'essai, Chauvin Arnoux a même breveté son système ALT (*Advanced Loop Test*).

■ **Pourquoi et comment mesurer la terre ?**

Normes CEI/EN 61557-5 :

– par la méthode 1 piquet auxiliaire (TT & IT impédant) ;
– il faut trouver *RA* le plus faible possible pour permettre l'écoulement à la terre des courants de défaut.

■ **À quoi sert la mesure de boucle ?**

– Faire une mesure de terre par excès sans planter de piquet (pratique en milieu urbain).
– Calculer le courant de court-circuit afin de vérifier le dimensionnement des dispositifs de protection.
– Mesurer la tension de défaut (sonde raccordée).

■ **Pourquoi vérifier la continuité ?**

Un conducteur PE en bon état et raccordé correctement à la barrette de terre écoulera les défauts à la terre.

■ **Comment identifier les différentes phases d'un réseau triphasé ?**

Par une indication claire de leur sens de rotation.

13.7.5 Mise en œuvre des essais et normes à respecter

Remarque importante : pour éviter toute erreur de manipulation, ces appareils contrôlent avant chaque mesure et automatiquement, l'état de l'installation sur laquelle ils sont branchés : position de la phase, présence de tension sur la terre, coupure de la terre… En cas de problème, toute mesure est impossible.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

13.7.6 Accessoires utiles d'accompagnement

Le logiciel C.A 611X Utility sous Windows assure la récupération intégrale des données mémorisées dans l'instrument et la création rapide de protocoles (tableaux de synthèse de mesures, rapports…).
De plus, ce logiciel autorise un paramétrage total de l'appareil depuis un PC : modification des seuils programmés, choix de la langue, coordonnées de l'utilisateur…
La sonde se branche sur la prise RS232 et dispose d'une borne pour brancher l'un des trois cordons de test L, N ou PE, au choix. Un poussoir au dos permet d'éclairer le point de mesure, fonction très utile pour les mesures hors tension, comme l'isolement par exemple.
L'imprimante série pour un rapport immédiat : les résultats des différentes mesures enregistrées par l'appareil peuvent être édités directement sur le terrain sur un ticket format A6.

Figure 13.46 – Sonde à commande déportée. L'utilisation de la sonde assure une prise directe de mesure grâce au bouton jaune situé sur la sonde qui a la même fonction que la touche TEST du C.A 6114.

■ **Un atout supplémentaire !**

- Deux types de pinces utilisables selon vos applications et la section de vos câbles.
- Mesure de courant alternatif jusqu'à 300 A.
- Mesure de courant de fuite à la terre à partir de 4 mA, pour localiser efficacement et rapidement les défauts d'isolement.
- Mesure « sélective » de terre, par enserrement d'un seul câble de mise à la terre parmi plusieurs en parallèle, sans aucune déconnexion.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

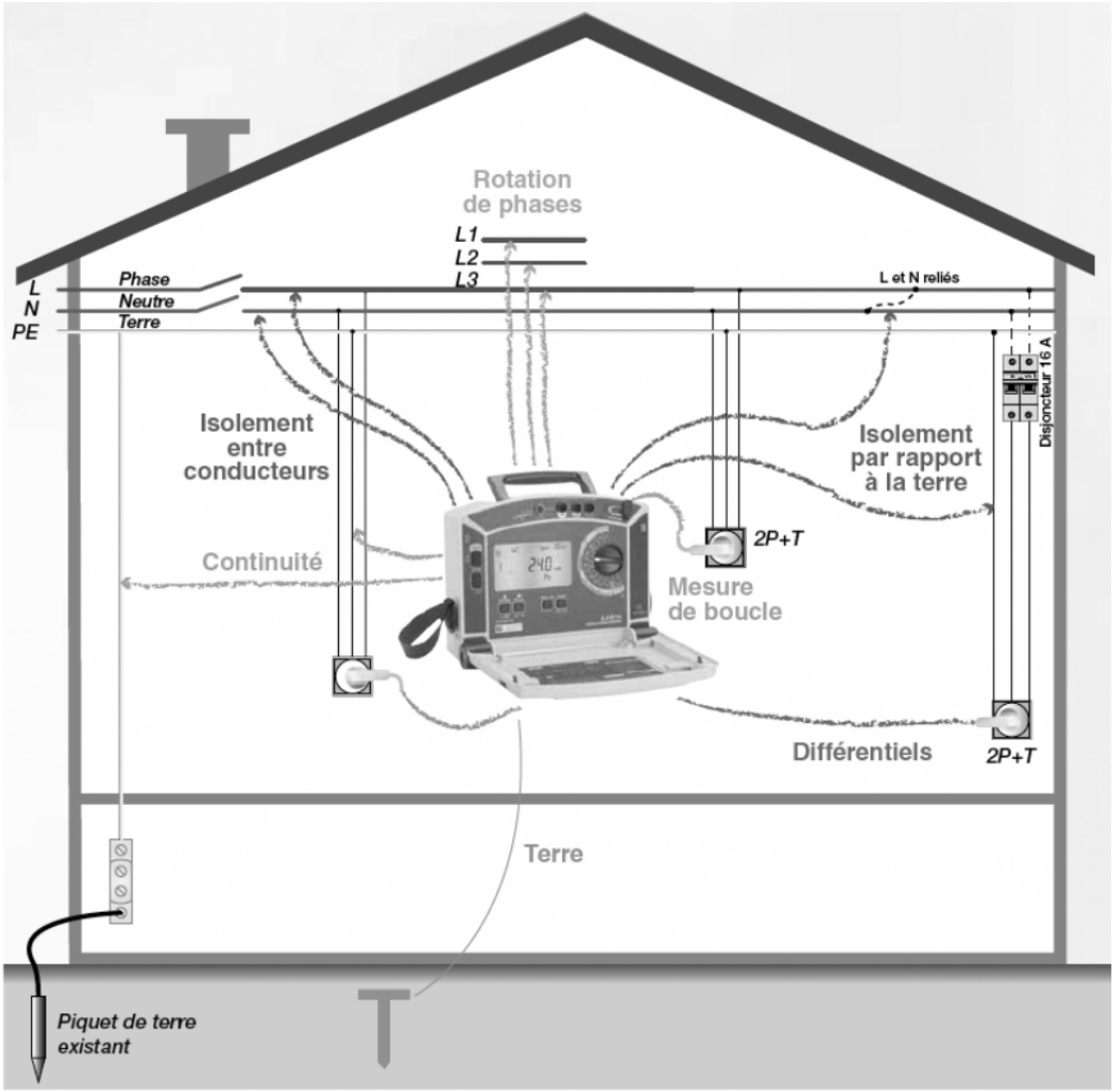


Figure 13.47 – Mise en situation du C.A 6115 (Chauvin Arnoux).

13.8 Contrôleurs de transformateur de puissance

13.8.1 Objectifs

Contrôler le rapport de transformation des transformateurs de tension et de courant par la méthode de l'excitation primaire pour une sécurité maximale. Il fournit automatiquement la polarité et le courant de test. Il est compatible avec les transformateurs triphasés en augmentant le nombre de mesures.

Le ratiomètre numérique et portable est conçu pour les essais sur site des transformateurs de puissance, de tension et de courant. Raccordé à un transformateur hors tension, celui-ci mesure précisément le rapport de transformation primaire à secondaire, tout en affichant simultanément la polarité et le courant de test.

Il est entièrement automatique et sa méthode d'essai respecte les normes ANSI/IEEE.

Plus besoin de sélection de gamme, de démarrage avec manivelle (magnéto) ou de réglage fastidieux.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

À chaque mesure, il se calibre automatiquement, vérifie l'absence de coupures sur les enroulements/connexions, de courts-circuits (courant d'excitation excessif), contrôle le bon placement des cordons de test et une éventuelle inversion de polarité. Les mesures sont rapidement et précisément affichées.
La sécurité de l'opérateur a été prise en compte. Les essais sont effectués à basse tension et à la différence d'autres ratiomètres, une excitation de type « abaissement de tension » est utilisée.
Cette méthode, utilisée avec un circuit de protection contre les inversions H/X (primaire/secondaire), protège contre la génération de tensions de test dangereuses, souvent utilisées sur les instruments de mesure de rapport de transformation.
Un grand affichage alphanumérique à cristaux liquides sur deux lignes, avec rétroéclairage et contraste réglable garantit la lisibilité de jour comme de nuit.
L'alimentation est fournie par une batterie NiCd interne ou par le secteur 230 V (ou 115 V). Les batteries sont automatiquement chargées pendant le fonctionnement sur le secteur.
À la fois robuste et fiable, il est intégré dans un boîtier ergonomique en polypropylène étanche, conçu pour résister aux rigueurs d'une utilisation sur le terrain.

13.8.2 Applications et appareillages

- Maintenance industrielle.
- Poste BTB/BTA pour un test de fonctionnement.
- Maintenance préventive…

13.8.3 Méthodologie

Le DTR 8500 (*figure 13.48*) possède trois boutons poussoirs correspondant aux trois fonctions : marche/arrêt, mesure et contraste de l'affichage.

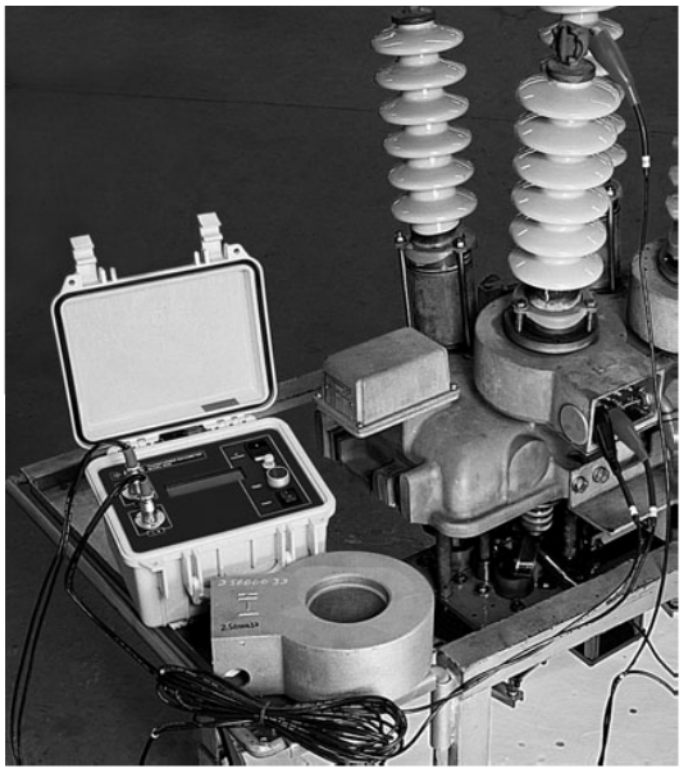


Figure 13.48 – Contrôleur de transformation de puissance DTR 8500 (Chauvin Arnoux).

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

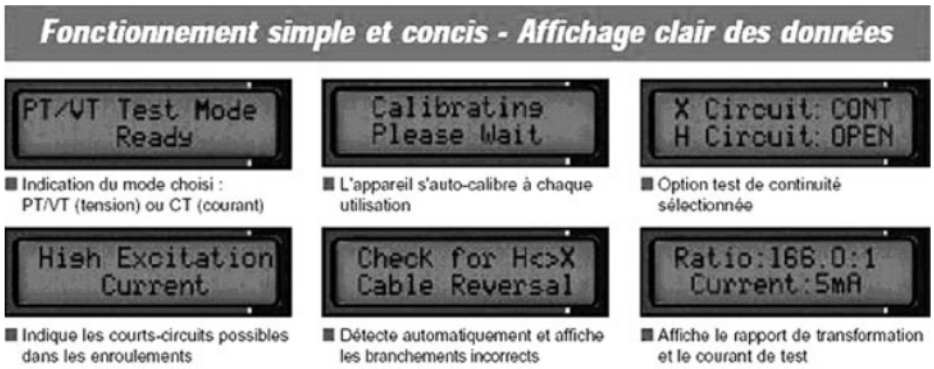


Figure 13.49 – Affichages des données de sécurisation et des résultats de l'essai, ici un rapport 166 :1.

13.8.4 Fiche technique

- Gamme de rapports de transformation mesurables : 0,8000:1 à 15 000,0:1.
- Affichage de la polarité et du courant de test.
- Contrôle de continuité, coupures, courts-circuits…
- Écran LCD à contraste réglable 2 lignes, 20 caractères, affichage de messages d'erreurs : coupure, court-circuit, mauvaises connexions…
- Alimentation sur secteur 230 V ou 115 V AC ou sur batteries internes rechargeables.
- Normes : sécurité électrique, CEI 61010-1 – 300 V – Cat. III – Pol. 2.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

C

Préoccupations diverses liées à la mesure

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

14 • SÉPARATION DES CIRCUITS (ISOLATION GALVANIQUE)

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle

14.1 Attention aux boucles de masse dans les chaînes d'acquisition

La présence de boucle de masse ou plan de masse perturbe les signaux de mesure même si les câbles de transmission sont blindés à paires torsadées.

Une des méthodes est d'isoler ces bouclages du reste de la mesure par des isolateurs bien choisis et correctement placés.

Les boucles de masses apparaissent lorsque deux équipements interconnectés ont des références de masse différentes.

C'est le cas de deux appareils éloignés raccordés par deux alimentations séparées, même si les carcasses sont référencées à la terre.

Le potentiel du sol n'est pas constant (le 0 V n'est pas partout) vu que la liaison au neutre est faite en début d'installation 50 Hz. Tout branchement entre neutre/terre en un point du réseau se traduit par le passage d'un courant alternatif 50 Hz entre les deux masses.

Ainsi ce courant dépendant de l'impédance de cette boucle va se superposer aux signaux et engendrer des bruits sur les signaux et souvent des valeurs tronquées au niveau des mesures.

Les mêmes constats sont réalisés en continu, où deux alimentations continues ont une référence commune à la terre.

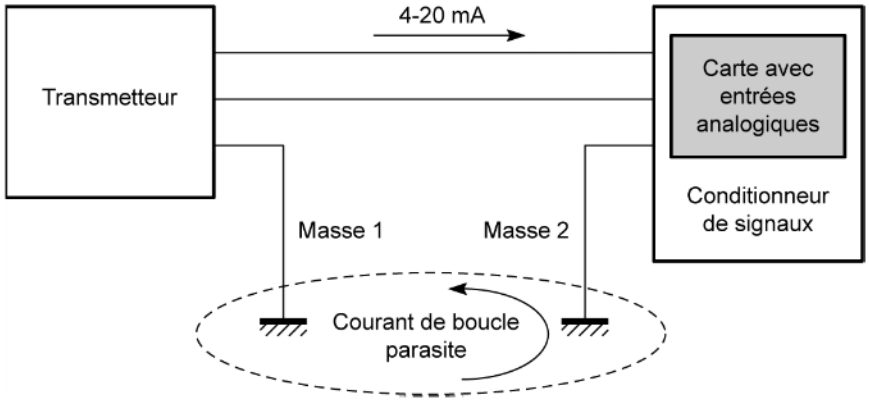


Figure 14.1 – Mise en évidence d'une boucle de masse dans une chaîne d'acquisition.

En raison de cette « fausse référence commune » une variation de tension à un endroit va altérer la tension à un autre et les tensions générées vont s'influencer mutuellement en fonction de la charge. Il sera impossible d'envisager de compenser ces variations soit du côté du transmetteur soit du côté du récepteur.

■ Palliatifs

Une des solutions des plus efficaces est d'installer des isolateurs qui, en plus d'éliminer les boucles de masses en simplifiant les installations, ne nécessitent aucune maintenance après un bref paramétrage.
On les place entre le capteur et le récepteur dans la chaîne d'acquisition.
Ils sont constitués d'un transformateur ou d'un optocoupleur et coupent galvaniquement la liaison entre les potentiels de terre du capteur et du récepteur.
Ils possèdent un filtre passe-bas (en général de fréquence de coupure de 30 Hz, de temps de réponse de 11 ms, suffisamment rapide pour beaucoup d'applications) pour éliminer les perturbations hautes fréquences de type électromagnétique ou radio ou générées par les alimentations 50 Hz.

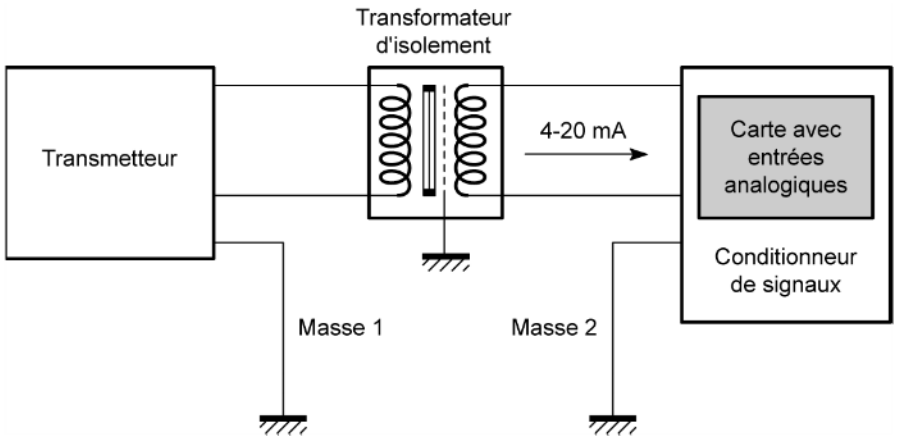


Figure 14.2 – Isolation galvanique par un transformateur d'isolement.

□ Pièges à éviter

– Mauvaise alimentation de la boucle 4-20 mA : il y a trois possibilités d'alimenter la boucle, par le transmetteur, le conditionneur.
– Bien étudier une installation déjà constituée pour définir le type d'alimentation de la boucle.

□ Isolateurs à alimentation extérieure

Les isolateurs les plus couramment utilisés sont alimentés en 24 Vcc, certains par le réseau alternatif 24 V.
Cette solution technologique mettant en œuvre un isolateur à 3 voies (entrée, sortie, et alimentation de l'isolateur, toute isolée les unes des autres) présente de nombreux avantages :

– Les isolateurs ont l'avantage d'avoir une impédance d'entrée de faible valeur (50 Ω) et charge peu la boucle d'entrée, cela est appréciable surtout dans les installations à grandes distances de transmission.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

– Certains isolateurs sont « universels », ils assurent aussi les conversions de signaux grâce à une entrée/sortie configurable.
– La boucle de sortie est alimentée indépendamment de la boucle d'entrée et permet une grande distance de transmission et/ou à la mise en série d'appareils comme un automate et un afficheur.

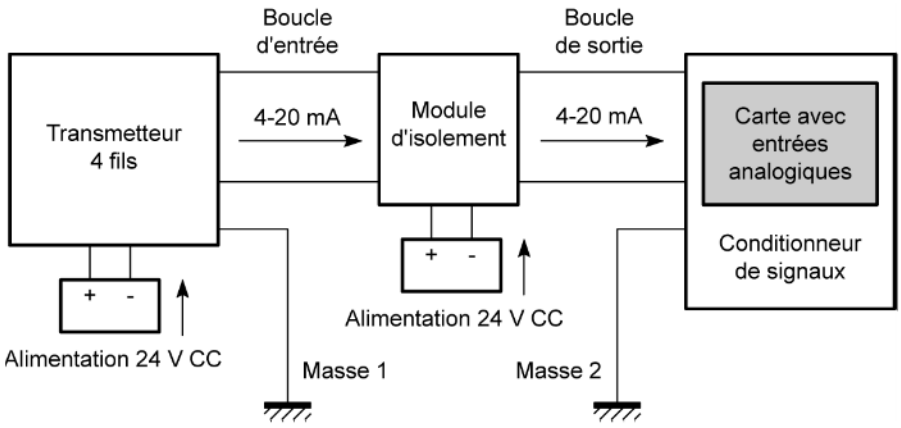


Figure 14.3 – Autre palliatif possible : module d'isolement à alimentation extérieure.

☐ Isolateurs alimentés par la boucle d'entrée

Dans ce cas, l'isolateur assure l'interface entre le transmetteur (boucle d'entrée) et une carte d'automate (boucle de sortie). Il devient une charge supplémentaire et engendre une chute de tension sur la ligne. Il faut que l'utilisateur calcul si cette chute de tension permet ou non l'alimentation de cette carte automate ou de l'indicateur à tableau en sortie.
Le constructeur fournit la plupart du temps la chute de tension de son isolateur.
On peut calculer la chute de tension totale par cette formule :

$$V_{\text{chute de tension totale}} = V_{\text{chute de tension interne isolateur}} + (20 \times 10^{-3} . R_{\text{entrée du récepteur}})$$

avec $20 \times 10^{-3} = 20$ mA
En général ces isolateurs sont utilisés pour des signaux courants en raison de la chute de tension qui fausserait les valeurs en tension.

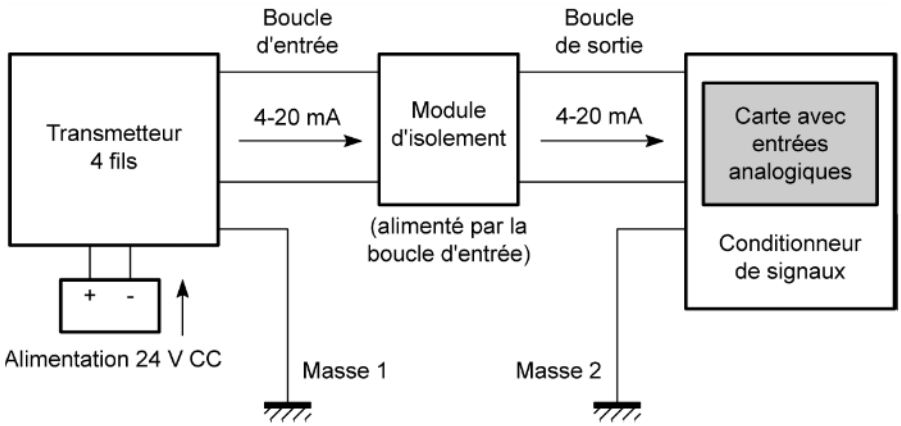


Figure 14.4 – Module d'isolement à alimentation par la boucle d'entrée.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

☐ Isolateurs alimentés par la boucle de sortie

Très prisés lors de la rénovation d'installation (faciles de mise en œuvre car alimentés par le récepteur) ou lorsqu'il y a trop d'alimentation sur la ligne (des conflits apparaissent entre l'alimentation du récepteur et celle du transmetteur, qui tentent de contrôler toutes deux la boucle).

Par contre un tel isolateur ne fonctionne qu'avec des signaux courants car il prélève l'énergie à son électronique sur la boucle de sortie ; du côté de l'entrée les signaux sont au choix (tension ou courant).

Inconvénients : le problème de la chute de tension déjà rencontré se pose encore mais ici à la boucle de sortie surtout si les charges sont importantes.

Cet isolateur est en général utilisé pour une isolation monovoie afin d'exploiter une alimentation existante évitant ainsi à l'utilisateur d'en ajouter une autre.

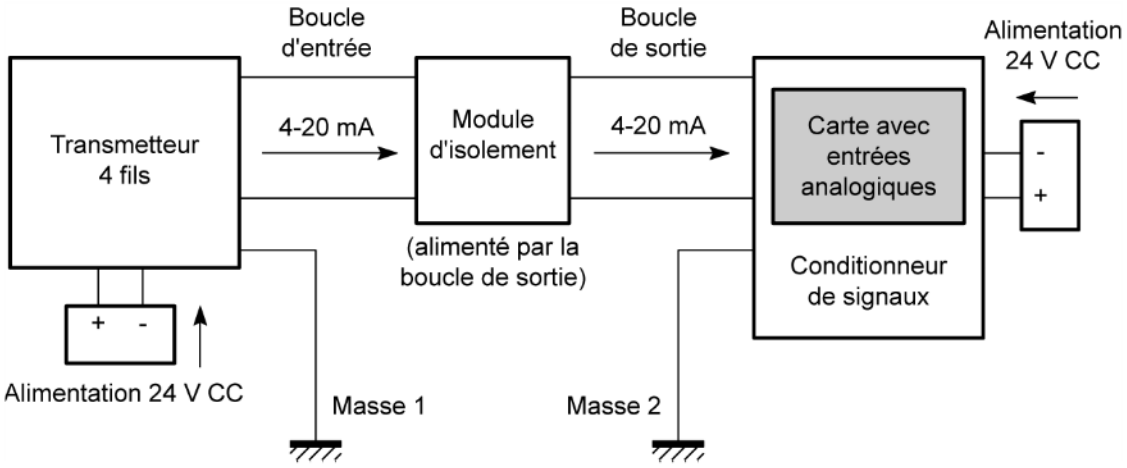


Figure 14.5 – Module d'isolement alimenté par la boucle de sortie.

☐ Isolateurs perfectionnés (compatibles avec le protocole HART)

Ce type d'isolateurs assure l'alimentation de la boucle d'entrée et de sortie en 24 Vcc. Il offre le plus souvent une isolation deux voies entrée/sortie et entrée/alimentation, et fournit 30 mA à la boucle d'entrée de quoi alimenter un transmetteur.

Les boucles d'entrées/sorties doivent être un signal analogique (courant) auquel vient se superposer un signal numérique servant à échanger des informations de paramétrage ou de diagnostic.

Principe : additionner au 4-20 mA une onde sinusoïdale de 0,5 mA d'amplitude fixe et de fréquence variable.

Une onde sinusoïdale de 1 200 Hz correspond au bit 1 et la fréquence de 2 200 Hz au bit 0.

Cela permet de transférer des informations plus complètes et complexes entre le capteur et le transmetteur sans liaison supplémentaire.

Cet isolateur possède en plus un circuit de reconnaissance et de transmission de ces signaux numériques.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

14.2 Attention au mode commun !

La grandeur la plus mesurée dans l'industrie est la température, le plus souvent avec des thermocouples peu coûteux, couvrant une large gamme de valeurs et utilisables dans de nombreuses applications.

Ils sont basés sur l'association de deux conducteurs reliés générant une f.e.m. de quelques millivolts variant en fonction des températures de jonctions entre les conducteurs.

Ce signal est amplifié ensuite pour que l'électronique puisse fonctionner avec une résolution de mesure acceptable. Or les amplificateurs à bases d'amplificateur opérationnels saturent à partir du dépassement de leur tension d'alimentation ± 12 V.

C'est pourquoi les constructeurs d'amplificateur d'instrumentation définissent un paramètre nommé « taux de réjection de mode commun » (TRMC ou *Common-mode rejection ratio*) indiquant la limite d'amplification de tension en mode commun.

Ce taux est défini par le rapport entre la tension de mode commun et celle apparaissant à la sortie de l'amplificateur :

$$TRMC = V_{\text{mode commun}} / V_{\text{sortie de l'amplificateur}}$$

La réjection de mode commun est exprimée par le logarithme du $R_{MC} = 20 \log_{10} TRMC$.

La réjection d'un étage d'entrée d'un bon instrument est d'au moins 100 dB. Selon la technique utilisée, un système isolé est de 120 à 160 dB. Mais attention, suivant le thermocouple utilisé, un R_{MC} de 140 dB peut être fatal.

Dans un système d'acquisition de mesures, il existe deux tensions de mode commun V_{MC} et V'_{MC} (*figure 14.6*). V_{MC} est la tension de mode commun entre chaque fil de mesure et la chaîne d'acquisition. La tension V'_{MC} disponible pour la mesure s'exprime par la relation suivante :

$$V'_{MC} = (Z_{MC}/(Z_{MC} + Z_{MASSE})) \cdot V_{MC}$$

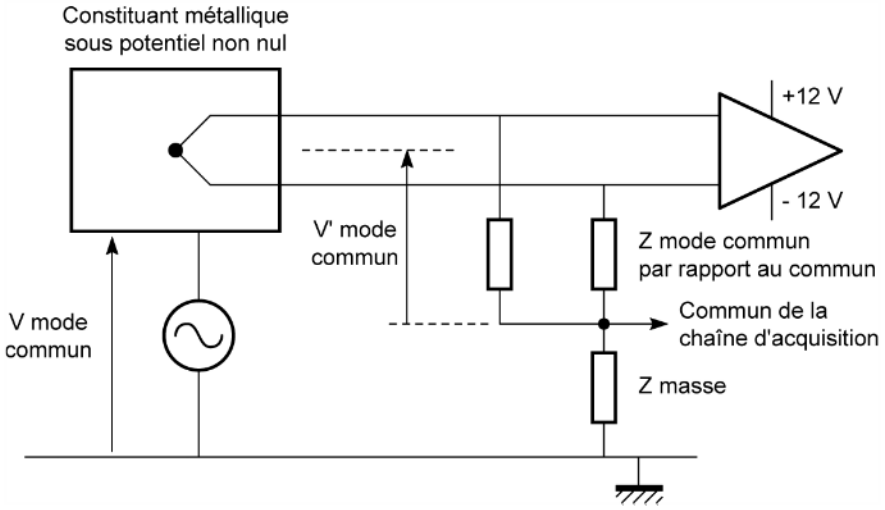


Figure 14.6 – Schématisation du mode commun.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Pour que la mesure soit possible, il faut que la tension présente sur les deux fils du signal appliqué à l'amplificateur n'excède pas ± 10 V pour un amplificateur alimenté en ± 12 V.

Un thermocouple type T de sensibilité de 40 mV/°C est perturbé par une tension non rejetée de 62 mV (tension de mode commun de 220 V, crête de 622 V) soit une erreur de 1,55 °C pour des températures ambiantes.

Mais dans certaines applications, les thermocouples sont en contact direct avec des surfaces eux-mêmes soumises à des potentiels non négligeables par rapport au 10 mV généralement délivré et rendant les mesures fausses ou impossibles.

Comme elles sont présentes sur les deux fils du thermocouple, on les appelle « tension de mode commun ».

Elles sont présentes lors de mesure de température sur les parties électriques d'un équipement sous tension alternatif (en haute tension sur des lignes, au primaire d'un transformateur, sur une résistance de chauffage, sur un bobinage de moteur, etc.).

Elles peuvent se retrouver sous la forme de tension continue, sur des matériels non reliés à la masse et se retrouvant à des potentiels élevés dus à des condensateurs parasites même hors tension.

Ces condensateurs parasites réalisent des couplages entre les équipements électriques et les objets métalliques environnants non isolés et non reliés à la masse.

Les tensions de mode commun sont uniquement dues aux tensions alternatives, lorsque celles-ci sont appliquées aux bornes d'un condensateur parasite présent entre l'objet non isolé et un équipement sous tension, il y a un cycle permanent de charge/décharge favorisant le passage d'un courant alternatif dans le condensateur réalisant alors un couplage.

Par exemple (*figure 14.7*), les tôles d'un transformateur (non alimentées bien évidemment) présentent un potentiel à cause des condensateurs parasites avec l'alimentation électrique (CAB) et la masse (CBM). Celui-ci est appelé tension de mode commun (VMC) et peut être mis en évidence par un voltmètre relié à la masse (symbolisé par une conduite d'eau).

Avec une alimentation en courant continu, le problème ne se pose pas, car aucun courant ne circule une fois que la capacité du condensateur parasite est chargée.

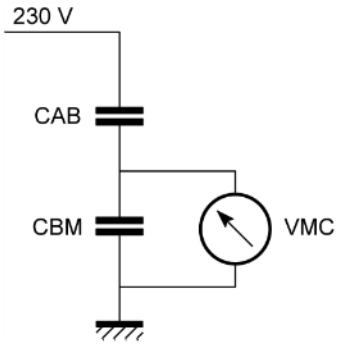


Figure 14.7 – Schématisation du mode commun sur un transformateur.

■ Palliatifs

Utiliser un **instrument de mesure de la température autonome** ne présentant aucun point commun avec une source d'alimentation externe, ni de liaison de

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

communication avec le système d'acquisition. Mais ces instruments ne peuvent être utilisés pour des mesures continues dans le temps.
Ainsi le meilleur moyen est d'utiliser un instrument possédant une alimentation secteur et une liaison pour la transmission important une masse à l'intérieur du système susceptible d'ajouter les problèmes évoqués ci-avant.
Un des moyens déjà vu est l'isolation galvanique pour assurer une mesure précise par thermocouples en contact avec une surface au potentiel non nul.

☐ Thermocouples isolés

Ces capteurs donnent une fausse image d'isolation par leur boîtier métallique qui peut être en contact avec un constituant sous tension. Ainsi le thermocouple se trouve couplé par un condensateur parasite à l'équipement sous potentiel et fournit une tension trop importante à l'étage d'entrée de l'amplificateur.
Pour cela il faut utiliser un **transmetteur de process ou conditionneur de signal à associer** au thermocouple.
Ils délivrent des signaux 4-20 mA de courant pour les grandes distances ou 0-10V de tension pour des distances plus modestes, signaux linéarisés et isolés de plus d'une centaine de volts par optocoupleur ou transformateur.
Mais leur coût est encore élevé et leur calibrage périodique est à réaliser, même si ensuite l'utilisation d'un système d'acquisition non isolé est moins coûteuse.

☐ Indicateurs numériques de tableau pour thermocouple

Ces appareils sont isolés du secteur par leur alimentation (transformateur) à une centaine de volts du fait de l'espace entre le connecteur et le transformateur de l'alimentation interne.
Mais la connexion à un PC impose d'utiliser un CAN isolé et élève le coût de cette solution.

☐ Multimètres numériques avec multiplexeur à relais

Ils permettent la mesure séquentielle d'un nombre important de signaux de nombreux types de thermocouples sous potentiel.
Leur vitesse de scrutation est suffisamment élevée pour lire un grand nombre de voies tandis que celle des convertisseurs analogiques/numériques à intégration est suffisamment lente pour moyenner le bruit non filtré par l'isolation.
Mais des problèmes peuvent survenir lors d'une grande différence de tension sur deux voies lues consécutivement.
Les relais de commutation voient des tensions parfois élevées, exemple 400 Vcc, si sur une voie, une capacité interne se charge à + 200 V et sur l'autre à – 200 V toujours par rapport à la masse.

☐ Multiplexeur avec convertisseur analogique/numérique rapide

Pour un grand nombre de voies nous venons de constater les problèmes dus à la présence des relais statiques, ici ils sont remplacés par des multiplexeurs électroniques plus rapides que leurs confrères à intégration mais qui eux apportent un problème d'isolation des voies entre elles car on ne dispose pas de filtrage de l'alimentation.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Pour cela on synchronise une série de mesures avec la fréquence du réseau 50 Hz ; et en moyennant une série de mesures, l'essentiel du bruit de fond de l'alimentation est filtré.
Ces dispositifs ont un excellent coût par voie et peuvent accueillir plusieurs types et gamme de thermocouples et de plus les mesures sont centralisables sur un PC, et calibrée par logiciel avec un minimum d'équipement.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

15 • SERVICE APRÈS-VENTE ET ÉTALONNAGE INSTRUMENTATION – MÉTROLOGIE

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit. Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle

15.1 Définition et contraintes

Ce type de SAV professionnel est avant tout un organisme de prestations de services nécessitant, un ou des laboratoires accrédités, des moyens humains spécialisés et pour permettre le contrôle des appareils qui lui sont confiés, des matériels de mesure de haute précision reliés aux étalons nationaux.

Un appareil de mesure ne peut, en aucun cas, être comparé à un appareil électronique « grand public », tel qu'un poste de radio portatif ou même une chaîne Hi-Fi.

La réparation d'un simple multimètre exige :

- l'expertise de techniciens et ingénieurs qualifiés dans le domaine particulier de l'instrumentation ;
- des composants de remplacement triés, de grande précision et stables ;
- une fois le dépannage effectué, le « réglage » de l'appareil dans toutes ses fonctions et calibres avec des appareils étalons ;
- de vérifier que l'appareil est toujours conforme aux normes en vigueur (essais CEM, tenue en surtension…) ;
- une fois qu'il est assemblé et refermé, une période d'essais pour vérifier que l'ensemble ne dérive pas dans le temps (« table de chauffe »).

15.2 Étalonnage

Pour pouvoir prétendre étalonner un appareil de mesure, il est nécessaire d'être équipé de moyens métrologiques haut de gamme, avec traçabilité aux étalons nationaux, et enfin, d'être accrédité « COFRAC Étalonnage » pour les différents types de mesures à effectuer dans les domaines aussi variés que l'électricité, le magnétisme, la température, le temps, la fréquence, le dimensionnel, etc.

Ces accréditations sont délivrées à cette première condition et nominativement aux techniciens et ingénieurs chargés d'effectuer les étalonnages qui requièrent un haut niveau de compétence.

Après accréditation, le laboratoire métrologique de SAV peut, en plus de sa mission de dépannage :

– délivrer des constats de vérification (X 07-011), des certificats d'étalonnage (X 07-012) ;
– assurer, pour des entreprises, le contrôle et l'entretien de parcs d'appareils ;
– effectuer les installations et mise en service ;
– faire de la maintenance préventive et curative…

15.3 Coûts

Les montants des dépannages peuvent paraître onéreux, mais on comprend mieux après avoir pris connaissance de ce qui précède qu'ils dépendent directement de l'amortissement d'importants investissements, en personnels qualifiés et en appareillages spécialisés périodiquement vérifiés. L'évolution rapide des normes internationales et de la technologie occasionne aussi de fréquents et de nouveaux investissements en formation des personnels et en matériels. Par exemple, l'entrée en vigueur de la réglementation de la CEM (compatibilité électromagnétique) a occasionné à l'époque l'acquisition de chambre(s) anéchoïde(s) représentant des montants de plusieurs centaines de milliers d'euros à l'unité.
D'autre part, les composants sont souvent spécifiques (non standard et d'un délai d'approvisionnement long, parfois plusieurs mois), il est par conséquent nécessaire de constituer des stocks importants pour assurer un délai de service raisonnable. Ce stock « tampon » a un coût non négligeable.
Un appareil de mesure, qu'il soit « portable », « de table » ou « encastré », est avant tout un outil de travail.

15.4 Conclusion

Un service après-vente destiné à la maintenance des appareils d'instrumentation doit être spécifiquement équipé, être agréé COFRAC, être relié aux étalons nationaux et périodiquement contrôlé, être animé par des spécialistes de haut niveau pour chaque domaine de mesure.
Cette activité est très spécifique et constitue à elle seule un métier à part entière.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

16 • ORGANISMES DE CONTRÔLE

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

16.1 Définition

Les organismes de contrôle interviennent dans des domaines aussi variés que :

– la qualité,
– la sécurité,
– la santé,
– la préservation de l'environnement, etc.

Leurs agents contrôleurs ont pour mission de vérifier, initialement et périodiquement comme l'exige la réglementation, les installations fixes et les matériels qui y sont raccordés. Ces vérifications ont pour but de protéger les utilisateurs internes aux entreprises et le public en général dans les bâtiments susceptibles de les recevoir. Ils délivrent les attestations consuelles nécessaires avant toute obtention d'autorisation d'exploitation.

Voici, plus en détail, quelques exemples des domaines de compétences :

– énergie,
– gaz,
– machines,
– maisons individuelles,
– plomb,
– pollution,
– rayonnement,
– réseaux câblés,
– sécurité incendie,
– ventilation,
– vibration,
– bruit,
– aires de jeux,
– amiante, etc.

Ils ont aussi d'autres missions, notamment de conseil et de formation.

16.2 Principaux organismes nationaux ou internationaux

Par ordre alphabétique :

- AFITEST
- AIF
- AINF
- APAVE
- BUREAU VERITAS
- CAF
- CONSUEL/PROMOTELEC
- QUALICONSULT
- SOCOTEC
- SGS QUALITEST (spécialisé en mécanique)

Il existe aussi de nombreuses entités régionales ou locales :

- ALPES Contrôle
- BATIPLUS
- BECE
- PREVAS
- PREVENTEC
- TRANSCABLE, etc.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

17 • ADRESSES UTILES

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Voici une liste non exhaustive des principaux constructeurs de matériels de mesures, comptage, contrôle et régulation :

3M
bd de l'Oise
95006 Cergy-Pontoise cedex
33 01 30 31 68 00

ABB
5bis place de La Défense
92974 Paris – La Défense
33 01 41 97 44 00

Agilent
ZA de Courtabœuf
1 avenue du Canada
91947 Les Ulis

Alstom
25 av. Kléber
75116 Paris
33 01 47 55 20 00

Anixter
67-69 rue des Chardonnerets
BP50008 95945 Roissy Charles-De-Gaulle
33 01 48 63 73 73

AOIP
6 rue Maryse Bastié
BP182 91006 Évry
33 01 69 36 50 50

Carlo Gavazzi
ZAC Paris Nord II 169 rue de la Belle étoile
BP50248 95956 Roissy Charles-De-Gaulle
33 01 49 38 98 60

Centralp
21 rue Marcel Pagnol
69694 Vénissieux
33 04 72 78 35 35

Chauvin Arnoux/Metrix
190 rue Championnet
75876 Paris cedex 18
33 01 44 85 44 85

Crouzet automatismes
2 rue du docteur Abel
BP59 26902 Valence
33 04 75 44 88 44

Delta Dore
route de Combourg Bonnemain
35270 Combourg
33 02 99 73 45 17

Domange
198 avenue des Grésillons
92600 Asnières
33 01 46 88 46 46

DXI
22-26 rue St-Jean-de-Dieu
69366 Lyon cedex 07
33 04 72 76 78 80

Endress+Hausser
3 rue du Rhin
BP150 68331 Huningue cedex
33 03 89 69 67 68

Enerdis Chauvin Arnoux
1-9 rue d'Arcueil
BP 675
92542 Montrouge cedex
33 01 47 46 78 00

Eurosmart
5 rocade de la Croix-St-Georges Bussy-Saint-Georges
77603 Marne-la-Vallée cedex 3
33 01 64 76 34 34

Fluke France
Paris Nord II
69 rue de la Belle Étoile, Bât D
BP50236 Roissy-en-France 95956 Roissy CDG cedex
33 01 48 17 37 37

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Française d'instrumentation-Distrame
44 rue des Noës
10000 Troyes
33 03 25 71 25 83

Hager/Tehalit systèmes
132 bd d'Europe
bp72 67212 Obernai cedex
33 03 88 49 50 50

Hazemeyer Appareillage
ZI route de Grugies
02430 Gauchy
33 03 23 50 36 36

Honeywell
Parc technologique St-Aubin
91193 Gif-sur-Yvette
33 01 60 19 80 00

IVO industries
3 rue Denis Papin
BP103 67403 Illkirch cedex
33 03 88 55 29 00

Keithley
3 allée des Garays
91127 Palaiseau cedex
33 01 64 53 20 20

LDS (Ling Dynamic Systems)
Test and measurement : Gould
9 avenue du Canada
BP 221 Les Ulis
91942 Courtabœuf cedex

LeCroy
19 avenue de Norvège
Pavillon Narvik
ZA de Courtabœuf 1
91953 Courtabœuf cedex

Lem France
19 av. des Indes La ferme de Courtabœuf
91969 Courtabœuf cedex
33 01 69 18 17 50

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Manumesure
2-4 rue Georgette Agutte
75018 Paris
33 01 44 85 45 53

Megger Groupe AVO
29 allée de Villemomble
93340 Le Raincy
33 01 43 02 37 54

Metrix (voir Chauvin Arnoux)

National instruments
Centre d'affaires Paris-Nord
BP217 93153 Le Blanc-Mesnil cedex
33 01 48 14 24 24

Peak Electronic Design
West Road House
West Road
Buxton, Derbyshire
SK17 6HF
Royaume-Uni

Pyro-contrôle Chauvin Arnoux
244 av. Franklin Roosevelt
69516 Vaulx-en-Velin cedex
33 04 72 14 15 40

Radialex Würth Elektronik
109 rue du 1er mars 1946
BP1001 69612 Villeurbanne cedex
33 04 72 35 31 72

Radiospares
rue Norman King
BP453 60031 Beauvais cedex
33 08 03 03 40 34

Sagem
6 av. d'Iéna
75783 Paris cedex
33 01 40 70 63 63

Schneider electric
43-45 bd Franklin Roosevelt
92500 Rueil-Malmaison
33 01 41 29 70 00

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Shunts matériels
rue de l'Allière ZA du Maupas
14500 Vire
33 02 31 66 22 00

Siemens
29-47 bd Ornano
93527 Saint-Denis cedex
33 01 49 22 31 00

Socomec
1 rue Westhouse
67230 Benfeld
33 03 88 57 41 41

Tektronix
BP13 91941 Courtabœuf cedex
33 01 69 86 81 81

Wavetek
Fluke France
Paris Nord II
69 rue de la Belle Étoile – Bât. D
95956 Roissy – Charles-de-Gaulle cedex

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

INDEX

A

adaptation d'impédance 222
alimentation stabilisée 354
  programmable 356
  simple 355
  spécifique et mixte 356
analyseur
  d'énergie 306
  d'harmoniques 306
  de données série 125
  de flickers et d'harmoniques 330
  de perturbations 306
  de qualité de réseaux 306
  de signaux dynamiques 124
anisotropie 317
antenne de contact 58
appareil modulaire 332

B

bande passante 31, 79
barrière optique 402
base de temps 72, 85
  retardée 77
Bluetooth 364
boucle
  à « fond de fouille » 155
  de masse 465
  de process de 4-20 mA ou 0-10 V 437

C

câble de compensation 376
calcul des impédances 213
CAN 83
capacité de fuite
  d'un conducteur par rapport à la terre 172
  maximale 173
capteur de courant 221
  à bobine de Rogowski 222, 233
  à effet Hall 222, 236
    à flux nul 223, 241
  à effet stroboscopique 409
  AmpFlex 247
  de déplacement sans contact 412
  optique à effet Faraday 223, 241
catégorie de surtension 32
CBEMA 279
CEI/IEC 27
Celsius 387
CEM 312, 318, 329
CENELEC 27
centrale de mesures 302
chaleur 388
  rayonnée 387
chambre d'essai CEM 330
champ
  d'induction 317
  de rayonnement 317
  électrique 314
  électromagnétique 317, 320
  lointain 316
  magnétique 314
  proche 316
champmètre
  à bande étroite 321
  à large bande 321
charge
  déformante 172
  linéaire 268
  non linéaire 268
classe
  d'isolement 29
  de précision 401, 416, 418
  de protection 29
  I 190
  II double isolation 190
codeur
  absolu monotour et multitours 403
  incrémental 403
  rotatif optoélectronique 402
coefficient d'émissivité 382
commutateur de wattmètre 360
compteur
  d'énergie 295
    électronique modulaire 297
  fréquencemètre 360
conducteur
  actif 194
  de terre 144
conductibilité 316
conduction 388

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 3° du code de la Propriété Intellectuelle.

contact
direct 5, 133, 194
indirect 5, 133, 195
contrôle de continuité de terre 326
contrôleur
de transformateur de puissance 459
multifonction 449, 455
permanent d'isolement 139, 171, 205
universel 415
convection 388
convertisseur
analogique/numérique 83
rapide 471
de mesure 337
couplage 69
de déclenchement 75, 76
coupure 280
brève de tension 281
longue de tension 281
courant
de court-circuit 61, 185, 213
de défaut 61, 131
de fuite 326
harmonique 265
CPI 139, 171, 205
creux de tension 281
CTN 369
CTP 369

D

DAQ 119
data logger 344, 398
DDR 134, 185
DDT 47
déclenchement
spécial 95
sur base de temps retardée 75
défaut
asymétrique 173
symétrique 173
degré
de perturbation 319
de pollution 35
de susceptibilité 319
démarreur progressif 271
déséquilibre 284
détecteur
d'absence de tension 53
de tension 47
détection de câbles 431
déviation X-Y 78
DF 277
différentiel haute sensibilité de 30 mA 56
disjoncteur différentiel 135
dispositif différentiel à courant résiduel 134, 185
double base de temps 74
DPF 278

E

échantillonnage
de Shannon 87
temps réel et temps équivalent 89
échantillonneur-bloqueur 83
échelle
dilatée 334
moteur 334
normale 334
pseudo-linéaire 334
effet
Doppler 411
du courant électrique 8
physiologique du courant électrique 132
Seebeck 376
électrisation 4
électrocution 4
énergie réactive 259
enregistreur 348
de process à rouleau de papier 349
informatisé 351
papier à disque 349
entrée différentielle 109
EPI 47
équipement de protection individuelle 47
erreur
absolue 401, 416
de linéarité 401
relative 401, 417
essai de tenue diélectrique 162
étalonnage 440, 473
exactitude 401

F

facteur
CBEMA 279
de crête 268, 423
de distorsion 277
de puissance 257, 259
FFT 61, 100

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

fidélité 401
filtre
  actif 276
  passif LC 275
focus 68
fréquence
  de coupure 70
  de résonance 276
front de déclenchement 74, 76

G

galvanomètre 223
générateur
  arbitraire 124
  basse fréquence 358
  de décharges électrostatiques 330
  de fonctions arbitraires 359
  de foudre 329
  de perturbations 329
génératrice à courant alternatif 401
gradateur à découpage de phase 271
gyromètre 410

H

harmonique 271, 284

I

IEC/CEI 27
impédance d'entrée 48
infrarouge thermique 391
inter-harmonique 284
interpolation sinusoïdale 88
interrupteur différentiel 188
isolateur 466
isolation 222
  galvanique 466
isolement 326
  de l'ensemble de l'installation par rapport à la terre 166
  entre conducteurs 166
isotropie 317

J

joule 388

K

Kelvin 387

L

liaison
  Bluetooth 362
  Ethernet 107
ligne à retard 78
limiteur de surtension 141
  électrodynamique 178
localisateur de câble 434
logiciel 115
LVDT 410

M

masse 194
mesure
  automatique et traitement 97
  d'énergie 255, 295
  de boucle Phase-PE 155
  de capacité de condensateurs 448
  de continuité 159
  de couplage 156
  de la valeur de la résistance
    d'isolement 162
    de fuite 162
  de la vitesse 400
  de puissance 255
  de rotation de phase 435
  de terre
    avec un seul piquet auxiliaire 153
    en ligne dite « des 62 % » 150
    en triangle 152
    sans piquet auxiliaire 153
  du champ électromagnétique 320
mesureur de température et de tension 125
méthode
  de Wenner 146, 148
  des « quatre électrodes » 146
mètre 400
mode
  de déclenchement 74, 75
  Roll 94
  TV 77
  X-Y 78, 98
multifonction 340
multimètre 34, 415
  numérique 124
multitesteur 54

N

niveau de déclenchement 74

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.
Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes des articles L122-5 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

Copyright © 2007 Dunod. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite à l'exception des cas prévus aux termes de l'article L.122-5, 2° et 3° a) du Code de la Propriété Intellectuelle.

O

onde 389
  formée 317
  radioélectrique 318
organisme de contrôle 475
oscilloscope
  analogique 64
  numérique 81

P

parafoudre 178
perchette 58
perméabilité 316
permissivité 315
persistance 67
perturbation rayonnée 313
pince
  ampèremétrique 34, 245
  de puissance 295
  de terre 154
  harmonique 264
plan de masse 465
pont de mesures RLC 362, 449
POS 70
position verticale 70
précision 401
prise de terre 131
protection contre les courts-circuits 138
Pt 100 369, 374
puissance
  active 256
  fluctuante 256
  réactive 256

Q

qualimétrie 302

R

rayonnement électromagnétique 313, 390
régime
  de neutre 194
  de réquisition 25
  IT 197, 218
  TN 197, 218
  TT 197, 218
répétabilité 401
repliement 89
reproductibilité 401
réseau
  global 173
  îloté 173
résistance
  de terre 131
  d'isolement 163
  thermométrique 372
résistivité
  apparente cumulée 149
  du terrain 142
résolution 401, 418
  horizontale 85
  verticale 85

S

SAV 473
schéma de liaison à la terre 135, 194
  IT 135, 139, 185, 202
  TN 135, 137, 185
  TN-C 199
  TN-S 200
  TT 135, 136, 185
seconde 400
sélectivité
  ampèremétrique 137, 191
  chronométrique 137, 191
  partielle 191
  totale 191
sensibilité 401
  d'un dispositif différentiel 189
  des voies 68
service après-vente 473
sévérité du papillotement ou flicker 283
shunt 222, 224
signal bas niveau 437
SLT 135, 194
sonde
  différentielle de tension 59
    double 62
    isolée 30
  infrarouge 382
source de déclenchement 74, 75
spectre lumineux 389
surtension 281
  temporaire 282
  transitoire 282
système
  à codeur optique 402
  d'acquisition de données 119
  de déclenchement 74
  Reflex 402